

INSTITUTO DE INGENIEROS CIVILES DE ESPAÑA

# II CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA

Celebrado en Madrid durante los días  
28 de mayo a 3 de junio de 1950

TOMO III

*J. Garido  
Hoyos*

I 9 5 I



FUNDACIÓN  
JUANELO  
TURRIANO







451154-III

R 3519

FUNDACION JUANELO TURRIANO  
BIBLIOTECA







INSTITUTO DE INGENIEROS CIVILES DE ESPAÑA

# II Congreso Nacional de Ingeniería

TOMO III

ELECTRICIDAD

*Jaime  
Allopi*  
1953

MADRID

I 9 5 I



INSTITUTO DE INGENIEROS DE ESPAÑA

# II Congreso Nacional de Ingenieros

Tomo III

ELECTRICIDAD

*[Handwritten signature]*  
*[Handwritten signature]*  
1913



GRUPO II

ELECTRICIDAD

ACTAS DE LAS SESIONES Y TRABAJOS



GRUPO DE  
ELECTRICIDAD

ACTAS DE LAS REUNIONES Y DEBATES



## SECCIÓN 1.<sup>a</sup>



SECCIÓN



II CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA

(28 de mayo a 3 de junio de 1950)

ACTA DE LA SESIÓN CELEBRADA EL DÍA 29 DE MAYO DE 1950

*Se abre la sesión a las diez de la mañana. Se constituye la Mesa con el Presidente, D. Ricardo Rubio Sacristán, Ingeniero de Caminos; los Vicepresidentes, D. José Luis Redonet Maura, Ingeniero Industrial, y D. Rafael Spottorno Manrique de Lara, Ingeniero de Caminos, y los Secretarios D. Joaquín García Chamorro, Ingeniero Industrial, y D. José M.ª Álvarez Cienfuegos, Ingeniero de Caminos.*

*Tras unas palabras de salutación del Presidente, éste advierte que el primer trabajo que va a leerse, en su esencia pudiera tener cabida en otra Sección del Congreso, pero, dado que el asunto de la energía nuclear de que trata presenta perspectivas de utilización como fuente de energía eléctrica muy interesantes, ello es el motivo de incluirlo en esta Sección.*

*Seguidamente concede la palabra al Sr. Fontán Abeytúa, que da lectura al trabajo titulado:*

N.º 174. - Los reactores nucleares como fuentes de energía

Autores: D. LUIS FONTÁN ABEYTÚA y D. JULIÁN GARCÍA MAYORAL

Ingenieros Aeronáuticos

PREÁMBULO

No es intención nuestra el tratar de resolver ninguno de los problemas que puede plantear la obtención de energía en España, a partir de las reacciones nucleares, sino, simplemente, sacar algunas consecuencias, desde el punto de vista utilitario (tan importante para el ingeniero) de cuanta información hemos conseguido reunir sobre este apasionante tema.

Nuestra idea es que debe brotar cuanto antes entre los Ingenieros el afán de abordar los problemas técni-

cos que presenta la utilización de los enormes recursos que proporcionan las reacciones nucleares, ya en forma de energía o en la de cuerpos radioactivos artificiales, que han de ser de constante aplicación en la industria, renovando los métodos actuales de verificación y experimentación.

Creemos que en un plazo de cincuenta años, la potencia económica de un país se medirá por el grado de su progreso atómico.

A lo largo de la Historia, el hombre ha atravesado críticos momentos, al irsele agotando las conocidas



fuentes de energía y siempre la Divina Providencia le ha ido otorgando, por medio de la Naturaleza, nuevos recursos energéticos; en estos últimos años su generosidad no ha tenido límite, ya que estamos a punto de tener a nuestra disposición la misma esencia de la materia.

¡Dios quiera que este impresionante descubrimiento sea empleado para el progreso del mundo y no sólo para la guerra!

Las primicias de esta nueva Era atómica podemos situarlas en el año 1896, con el descubrimiento de los rayos uránicos, por Becquerel. Más tarde, los Curie observaron que la peblenda era más radioactiva que el uranio, y así descubrieron el radio (1898), lo que sirvió para desechar las hipótesis hasta entonces admitidas sobre la constitución de la materia.

A partir de estos años hasta ahora, la Física se impuso el resolver el problema fundamental de la constitución de la materia, encaminando las investigaciones con gran paralelismo entre la teoría y la práctica.

Este trabajo sistemático comienza con Max-Planck, creador de la teoría de los quanta, que sirvió a Bohr para modificar el esquema del átomo de Rutherford.

Por otra parte, Rutherford, en trabajo experimental, comprobó la existencia de un núcleo atómico con cargas, mediante la difusión de los rayos alfa a través de la materia. Guiado por esta idea, el mismo Rutherford lograba, en el año 1919, la desintegración artificial de los átomos, mediante la crucial reacción  ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p){}^{17}_8\text{O}$ , observada en la cámara de Wilson. Una verdadera explicación de esta reacción no habría podido ser dada de no haberse puesto en evidencia unos años antes la existencia de isótopos de los elementos.

El principal interés de esta reacción (aparte de que realizaba el sueño de los alquimistas) eran las diferencias de energía entre sus dos miembros, con lo que se confirmaba la observación hecha por Lavoisier (1811). Explica esta aparente contradicción de la ley de conservación de la energía la ley de Einstein  $E = mc^2$ .

Una superexcitación de los laboratorios experimentales para obtener estas transmutaciones culminó con el descubrimiento del neutrón por Chadwick (1932) y de la forma de moderarlo (sin captura) por los compuestos a base de cuerpos ligeros (grafito, agua pesada...).

Por otra parte, los teóricos, con sus nuevos descubrimientos, se preocupaban enormemente de orientar, en vía rápida, los experimentos. La mecánica cuántica, encauzada en el nuevo sentido por Luis de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Dirac, etc., formó la actual mecánica para explicar todo el microcosmos.

Un nuevo modelo atómico propuesto por Heisenberg y la onda de De-Broglie, asociada a un corpúsculo, ha sido la única teoría apropiada para explicar el papel de los neutrones lentos sobre el átomo; los experimentos para la obtención de elementos transuránicos fueron iniciados por Fermi (1936) (téngase en cuenta los potentes medios para la obtención de partículas que existían ya en aquel año: ciclotrón, sincrotrón, máquina de Van de Graaf...), trabajos que culminaron con el descubrimiento en Alemania de la escisión del uranio por Hahn y Strassmann, en el año 1939, y de que los productos de la escisión eran de peso atómico, aproximadamente la mitad del del uranio.

Meitner y Frisch explicaron teóricamente el fenómeno de la escisión. Más tarde (1941) se descubrió el gran papel que jugaba el  $\text{U}_{235}$  para llegar a conseguir la reacción en cadena, única que puede utilizarse para la obtención de energía.

En la escisión del uranio se obtiene toda una gama de compuestos de hacia la mitad de la escala de los elementos.

## ESCISIÓN DEL NÚCLEO DE URANIO

Los resultados de Hahn y Strassmann fueron confirmados por todos los principales laboratorios de física nuclear del mundo.

Mediante un estudio detallado se ha llegado a la conclusión de que los productos de la escisión no son siempre los mismos, sino que están en dos intervalos de la parte central del sistema de los elementos, y la naturaleza de éstos es consecuencia del número de neutrones y radiación  $\beta$  expulsada.

Un proceso típico de escisión puede verse en la figura 1, tomada de «Nuclear Fission and Atomic Energy» (página 25).

Experimentalmente se han conseguido 44 formas distintas de escisión del uranio.

Las escisiones se producen de acuerdo con la curva de la figura 2, en la que se ponen de manifiesto, en



# ESCISIÓN TÍPICA DE URANIO $^{235}_{92}\text{U}$

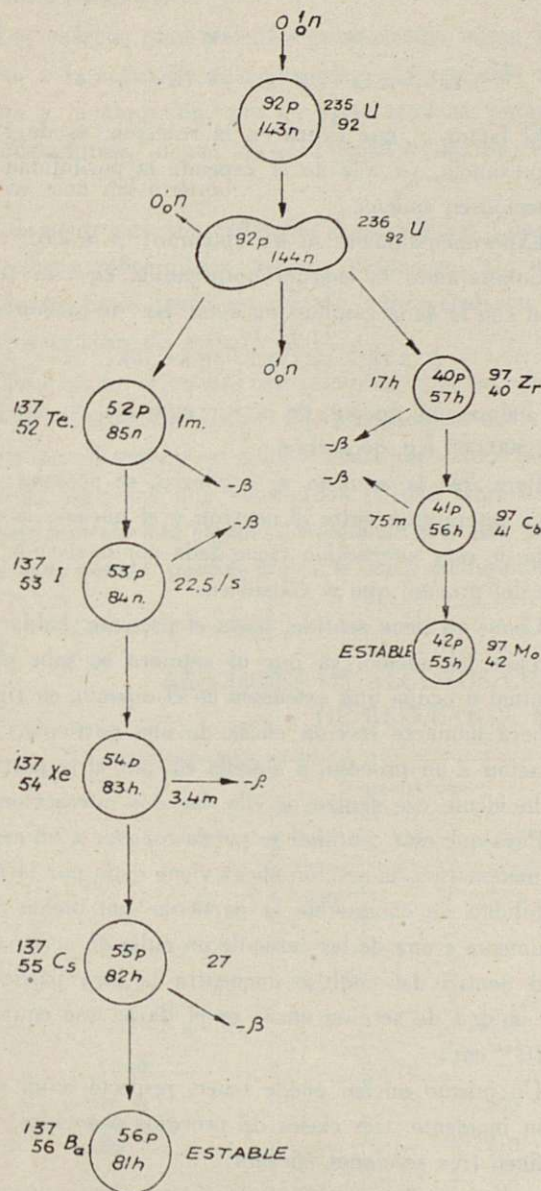


Fig. 1

tantos por ciento, los diversos elementos que pueden obtenerse a partir de una cantidad de uranio totalmente escindida. Obsérvese que la suma de las ordenadas correspondientes a la totalidad de los elementos es 100, y que esta curva no selecciona los isótopos.

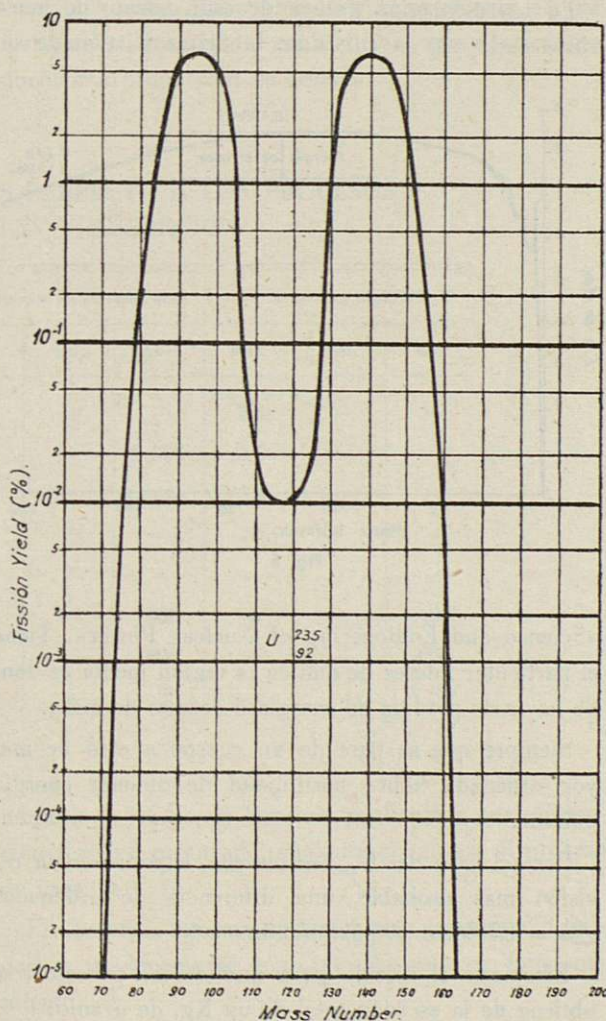
Las formas de escisión de máxima probabilidad son las correspondientes a los puntos de mayor ordenada, cuyos pesos atómicos son 96 y 138.

De cualquier manera que se produzca la escisión, se desprende una gran cantidad de energía que puede calcularse como se indica a continuación.

Para ello se supone un núcleo escindido en sus A componentes. Por la teoría de perturbaciones de mecánica cuántica, se deduce que dos partículas elementales crean entre sí un campo no coulombiano, que, en este caso, se llama campo nuclear.

Si hay A partículas, se supone que la energía E, perdida al unirse para formar un núcleo, es, en primera aproximación, proporcional al número de partículas:  $E/A = Q_1 \approx 8 \text{ M. e. v.}$

Sin embargo, esta energía queda disminuída por varias razones; una de ellas, es la de que, al estar



Datos tomados del libro The Science and Engineering of Nuclear Power.

Fig. 2



más cerca los protones, aumenta la energía del conjunto.

Teniendo en cuenta éste y todos los demás incrementos de energía, se puede representar E por la fórmula de Weiszäcker:

$$E = \Delta M = 0,001504 A - 0,014 A^{2/3} - a_3 Z^2 A^{-1/3} - a_4 \left( Z - \frac{A}{2} \right)^2 A^{-1} - \delta$$

$$a_3 = 0,000627 \quad a_4 = 0,083$$

$$\delta = \begin{cases} 0 & \text{si } A \text{ es impar} \\ \pm 0,036 A^{-3/4} & \text{si } A \text{ es par} \end{cases} \begin{cases} + & \text{si } Z \text{ es par} \\ - & \text{si } Z \text{ es impar} \end{cases}$$

(E viene dado en unidades másicas.)

La representación gráfica de este defecto de masa viene dada por la curva de la figura 3, tomada de

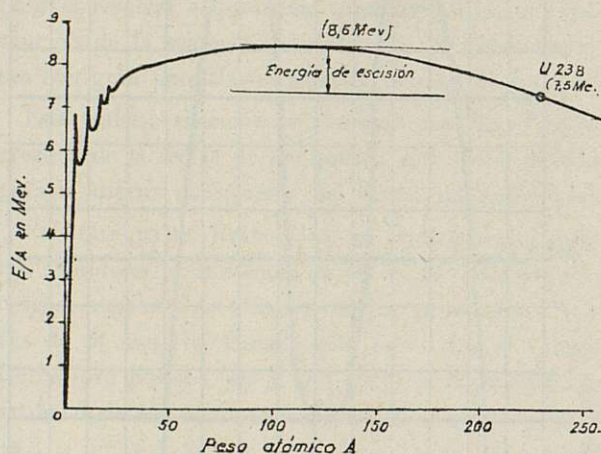


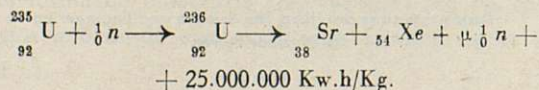
Fig. 3

«Science and Engineering of Nuclear Power». Tiene el particular interés de que en la región media es donde hay más pérdida de energía o defecto de masa.

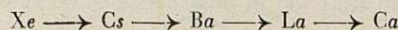
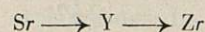
Siempre que se pase de un cuerpo a otro de mayor ordenada habrá posibilidad de obtener energía nuclear.

Para el caso del  $U_{235}$  se obtiene, suponiendo la escisión más probable, una diferencia de ordenadas  $\Delta h = 1,1$  M. e. v. por nucleón.

Efectuado el cálculo para uno de los procesos, se obtiene de la escisión total de un Kg. de uranio:



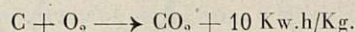
Hay, además, los siguientes pasos intermedios, en los que se desprende gran cantidad de radiaciones:



El factor  $\mu$ , que figura en la reacción, es de gran importancia, ya que de él depende la posibilidad de reacción en cadena.

Experimentalmente se ha obtenido:  $\mu = 2,6$ .

Comparando la energía desprendida en esta reacción con la de la combustión de un Kg. de carbón:



se deduce que un Kg. de uranio equivale, en energía, a 2.500.000 Kg. de carbón.

Para que la escisión se produzca, se necesita que haya interacción entre el neutrón y el núcleo; la medida de esta interacción viene dada por la sección eficaz del proceso que se considera.

Como no tiene sentido, hasta el presente, hablar de sección del núcleo, ya que ni siquiera se sabe si es puntual u ocupa una extensión en el espacio, en rigor, deberá llamarse sección eficaz de una partícula, con relación a un proceso, a aquélla en que, si la partícula incidente cae dentro de ella, las dos interaccionan.

Para que esta cantidad se pueda someter a un cálculo matemático, la sección eficaz viene dada por la probabilidad de choque de la partícula que incide normalmente a una de las caras de un cubo de arista unidad dentro del cual se encuentra la otra partícula. La unidad de sección eficaz es el Barn, que equivale a  $10^{-24} \text{ cm}^2$ .

Un mismo núcleo puede tener, respecto a un neutrón incidente, tres clases de procesos conocidos, que definen tres secciones eficaces:

- Escisión.
- Reflexión.
- Absorción o resonancia.

La absorción de un neutrón por el núcleo se produce debido a que sus nucleones forman una onda estacionaria, y la partícula incidente puede ponerse en resonancia con la del núcleo, quedando absorbida. La longitud de onda incidente es:

$$\lambda = \frac{h}{m v} = \frac{h}{p}$$

La longitud de onda del núcleo es grande y la velo-



cidad del neutrón en resonancia ha de ser, por consiguiente, pequeña.

Los cuerpos que, teniendo gran sección eficaz respecto a la reflexión de neutrones y despreciable respecto a la absorción, son de masa atómica pequeña (moderadores), juegan un gran papel en los procesos de escisión del uranio.

Los neutrones, son reflejados o absorbidos. Cuando se reflejan sobre núcleos ligeros pierden energía y se moderan. Estos neutrones (lentos o térmicos) son los únicos capaces de escindir el  $U_{235}$ .

Observando el cuadro de secciones eficaces, se ve que hay substancias como el  $H_2O$ , capaces de moderar neutrones al tener gran sección eficaz respecto a la reflexión, pero hay que desecharlas porque también la tienen respecto a la captura; solamente el grafito puro y el agua pesada pueden utilizarse como moderadores.

Para que un reactor nuclear tenga rendimiento, deberá estar formado por plutonio o  $U_{235}$  como cuerpos escindibles, por su gran sección eficaz para este proceso; agua pesada o grafito como moderador y, además, si se quiere que no se pierdan los neutrones lentos, el grafito, como reflector.

Para que tenga lugar la reacción en cadena, es necesario que exista una masa mínima de  $U_{235}$  o plutonio y que los neutrones sean lentos, para lo que es indispensable la presencia de moderador.

Aunque el coste de éste (agua pesada o grafito) es elevadísimo, queda compensado con el ahorro que supondría de masa de  $U_{235}$ , capaz de retardar los neutrones por choques sucesivos.

Para darse idea del coste del moderador, hay que tener en cuenta, que el agua pesada se obtiene por sucesivas destilaciones del agua normal, que contiene pe- queñísima proporción de aquélla.

#### SECCIONES DE ALGUNOS CUERPOS RESPECTO A LOS PROCESOS DE REFLEXIÓN, ESCISIÓN Y ABSORCIÓN

	Neutrones lentos			Neutrones en resonancia			Neutrones rápidos		
	Esc.	Ref.	Abs.	Esc.	Ref.	Abs.	Esc.	Ref.	Abs.
$U_{235}$ .....	420	—	—	30	—	—	2,4	—	—
$U_{238}$ .....	—	—	—	—	—	5.000	0,5	—	—
$Pu_{239}$ .....	420	—	—	30	—	—	2,4	—	—
$D_2O$ .....	—	—	0,33	—	?	—	—	?	—
Grafi. ....	—	—	—	—	?	—	—	?	—
$H_2O$ .....	—	—	500	—	—	400	—	—	400
Bo. . . . .	—	—	710	—	—	600	—	—	600
Li. ....	—	—	60	—	—	50	—	—	50

Las secciones eficaces indicadas en este cuadro vienen dadas en Barn.

Los trazos horizontales indican secciones eficaces despreciables para los procesos correspondientes.

#### REACTORES NUCLEARES

Los reactores nucleares se clasifican en pilas y bombas, según sea su factor de multiplicación, que es el

número de neutrones térmicos producidos por un neutrón térmico capturado, cualquiera que sea el proceso de captura.

En las pilas, interesa un factor muy cercano a la unidad y prácticamente constante durante su funcionamiento.

Para las bombas atómicas interesa que, bruscamente, el factor de multiplicación sea elevadísimo, para que se provoque la explosión; serán necesarias, por



lo tanto, varias masas de reactor, que en un momento determinado han de unirse, dando lugar a una masa superior a la crítica.

Las pilas pueden ser homogéneas o heterogéneas, según que el cuerpo que se ha de escindir y el moderador estén formando una mezcla homogénea o heterogénea.

Ambas pueden tener reflector, es decir, una envuelta de un cuerpo con gran sección eficaz para la reflexión de neutrones, y muy pequeña para la absorción, lo que reducirá el tamaño del reactor al aumentar el factor medio de multiplicación.

Se va a calcular una pila homogénea (esfera de  $\text{UO}_2$  + moderador).

Sea un foco inicial de neutrones en el origen de coordenadas y llamaremos  $N$  = número de neutrones por unidades de volumen:

$$N = N(x, y, z, t) = N(r, t)$$

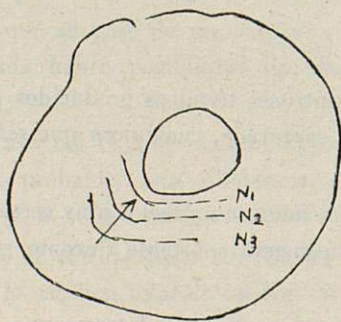
Sea un volumen  $v$ , con  $N$  neutrones y  $m$  partículas; la probabilidad de choque es el número que da el modo de combinar cada neutrón con cada partícula, o sea  $N \cdot m$ , y si hay  $n$  partículas por unidad de volumen, es  $m = v \cdot n$ , o sea, la probabilidad de choque es  $N v n$ .

El número efectivo de choques depende de un factor equivalente, intuitivamente, al tamaño de los corpúsculos, y, como siempre operamos con neutrones, es equivalente al tamaño del otro corpúsculo, o sea

n.º de choques =  $N v \cdot n$  . coeficiente de probabilidad

$$d\tau = \sigma N n dv$$

Sea una masa con  $N$  neutrones por unidad. Escogamos un volumen  $v$ .



$$N_1 > N_2 > N_3$$

Fig. 4

Suponemos que el gradiente neutrónico da el movimiento de los neutrones para alcanzar un equilibrio.

El flujo a través de la superficie es

$$\iint_s D \vec{\text{grad}} N \cdot \vec{ds} \quad , \quad D = \text{cte de difusión}$$

Esta integral da la aparición de  $Nv$  neutrones en el volumen  $V$ , pero, además, hay que contar las fuentes de neutrones y los sumideros.

La fórmula  $d\tau = \sigma N n dv$  nos da, para la escisión en el volumen  $dv$ ,

$$d\tau_{\text{escisión}} = \sigma_E N (\mu - 1) n_{235} dv$$

Puesto que por cada escisión se ganan  $\mu - 1$  neutrones.

Los absorbidos por el  $\text{U}_{238}$  e impurezas son

$$d\tau_{\text{RES}} = \sum \sigma_i N n_i dv$$

por lo que en un momento determinado habrá

$$(1) \quad \iint_s D \vec{\text{grad}} N \cdot \vec{ds} + \iiint_v \sigma_F N (\mu - 1) n_{235} dv - \iiint_v \sum \sigma_i N n_i dv$$

Mas

$$\iiint_v N dv$$

es el número total de neutrones y, por hipótesis, se supone que el incremento de esta integral por unidad de tiempo es la (1), resulta la ecuación

$$\iiint_v \frac{dN}{dt} dv = \iint_s D \vec{\text{grad}} N \cdot \vec{ds} + \iiint_v \sigma_F N (\mu - 1) n_{235} dv - \iiint_v \sum \sigma_i N n_i dv$$

Pero

$$\iint_s D \vec{\text{grad}} N \cdot \vec{ds} = \iiint_v \text{div} (D \vec{\text{grad}} N) dv$$

Si

$$\iiint_v F dv = 0$$

para cualquier  $V$  ha de ser  $F = 0$ . Y si  $D$  no es función de  $N$



$$D \Delta N + \left[ n_{235} \sigma_E (\mu - 1) - \sum n_i \sigma_i \right] N = \frac{dN}{dt}$$

$$D \Delta N + K N = \frac{dN}{dt} \quad (2)$$

y en función de  $\gamma$  queda

$$\Delta N = \frac{1}{\gamma} \frac{d^2(N \gamma)}{d\gamma^2}$$

y la ecuación diferencial (2) es

$$\frac{D}{\gamma} \frac{d^2(N \gamma)}{d\gamma^2} + K N = \frac{dN}{dt} \quad (2)$$

La solución, suponiendo

$$N = f(\gamma) \cdot \varphi(t)$$

es:

$$N(\gamma, t) = A \frac{\text{sen} \sqrt{\frac{K - \alpha}{D}}}{\gamma} e^{\alpha t}$$

siendo A y  $\alpha$  constantes de integración.

La pila homogénea tiene como inconvenientes fundamentales:

a) Que es difícil la regulación del factor de multiplicación, y no hay más recurso, para su variación, que anular con algún cuerpo muy absorbente la acción del reflector, si lo tienen.

b) Debido a la gran sección eficaz del  $U_{238}$  para la absorción de neutrones en resonancia, al estar íntimamente mezclados el  $UO_2$  con el moderador, gran parte de los neutrones se pierden antes de llegar a ser lentos y, por tanto, el factor de multiplicación medio es bajo.

La pila heterogénea trata de resolver estos dos inconvenientes de la homogénea. El moderador es agua pesada, en la que están parcialmente sumergidas barras de  $UO_2$ .

De esta forma, al escindirse los núcleos de  $U_{235}$  de una barra, los neutrones rápidos se van retardando al atravesar el moderador y pasan la zona de resonancia en él, no son, por tanto, absorbidos por el  $U_{238}$ , y al llegar a otra barra de  $UO_2$  los neutrones son lentos y aptos para escindir el  $U_{235}$ .

Esquemáticamente se puede poner la trayectoria de un neutrón de una barra a otra como sigue (fig. 5):

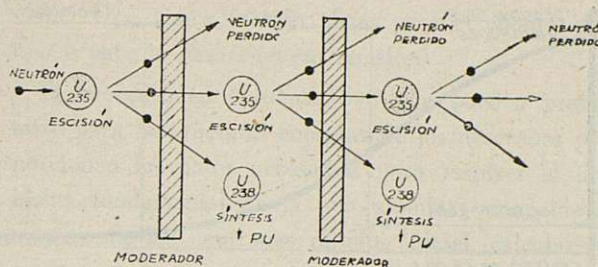


Fig. 5

La regulación del factor de multiplicación puede llevarse a cabo fácilmente sumergiendo en el moderador barras de boro (sección eficaz de absorción igual a 710 Barn).

Exteriormente, una pila heterogénea presenta el aspecto de un bloque de hormigón protector, que no se desarmará nunca, ni podrá ser accesible, por el peligro de las radiaciones.

Para darnos idea de la intensidad de la radiación producida diremos que una pila de un kilowatio produce de 70 a 90 Roentgen en 8 horas, y que un hombre muere con sólo 0,1 a 0,2 Roentgen en 24 horas.

Dentro de este bloque de hormigón se encuentra lo que se podría llamar el corazón de la pila, que es un recipiente de agua pesada en el que entran las barras de  $UO_2$ , y, en torno a este recipiente, se encuentra el reflector, encargado de rechazar los neutrones que, de otra forma, se perderían. Generalmente, está hecho de bloques de grafito apilados con gran precisión y estabilidad.

La forma de eliminar la gran cantidad de energía calorífica absorbida por el moderador, a causa de la liberada en la escisión, se puede conseguir mediante una bomba que hace circular el agua pesada a través de un refrigerante. La energía acumulada en el refrigerante puede ser empleada con fines industriales.

La pila atómica produce calor y, además, de ella se obtienen plutonio e isótopos radioactivos. Una pila atómica de mediana potencia (la pila atómica francesa, por ejemplo) consume muy poco óxido de uranio al mes: 1 Kg. aproximadamente.

De la pila son expulsados neutrones y diversas radiaciones. La radiación  $\gamma$  es peligrosa, y las precauciones contra ésta dan lugar a la necesidad del empleo del bloque de hormigón protector, de espesor suficiente para amortiguarla casi por completo.



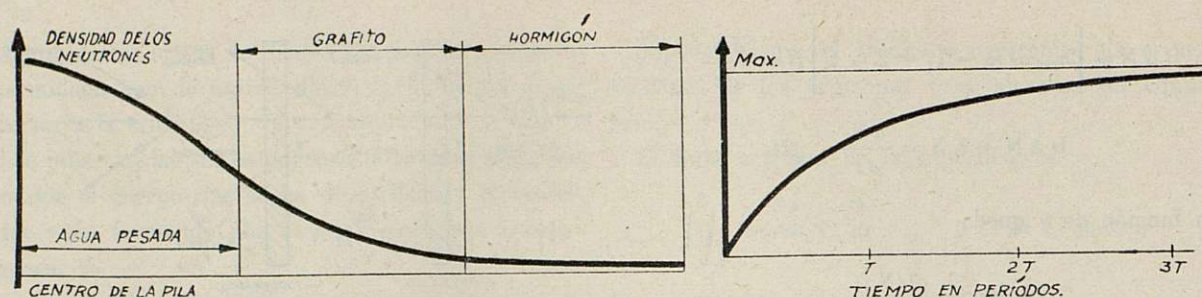


Fig. 6

El calor obtenido de la pila puede emplearse, o bien para calefacción, o para fuerza motriz.

Con objeto de poner en presencia de los neutrones libres emitidos en la pila, las sustancias que se quieren volver radioactivas artificiales, es preciso que, tanto el bloque de hormigón como el reflector de grafito, estén atravesados por canales para introducir las muestras de aquellas sustancias.

Los juegos de tolerancia han de ser reducidos al mínimo para evitar el escape de radiación por ellos.

Una de las dificultades técnicas de mayor envergadura es la de que todos los órganos móviles de la pila han de ser siempre los mismos, debido a las radiaciones mortales que emitirían al cambiarse.

Las impurezas, que presentan una sección eficaz grande a la absorción, sobre todo el boro, el litio y el cadmio, tienen importancia enorme y han de eliminarse totalmente. Consecuencia de esto, es la imposibilidad de engrasar piezas, así como la de que la atmósfera interior de la pila tenga las menores trazas de humedad.

Los accesorios de la pila se regirán por los más modernos recursos electrónicos, que han de tener extraordinaria sensibilidad, tanto para la medida de potencia como variaciones de temperatura, vigilancia de seguridad...

La bomba ha de funcionar sin ninguna pérdida de agua pesada; por el enorme precio de ésta, no ha de estar engrasada ni ha de dejar pasar ninguna traza de humedad.

Desde el cuadro de mandos se ha de llevar el de las barras de uranio, las cuales se pueden elevar y sumergir en el moderador tanto como sea conveniente. Asimismo, para regular el factor de multiplicación, se han de accionar unas barras de bario o cadmio de gran sección eficaz para la captura de neutrones.

La puesta en marcha de la pila la hacen neutrones vagabundos o la radiación cósmica.

Supongamos que un neutrón provoca la escisión en un núcleo de una barra de uranio sumergida en el moderador y que da lugar al nacimiento de la reacción en cadena.

La energía de un neutrón producido en la escisión viene a ser de 2 M e. v. y es, por lo tanto, rápido; si no hay la menor traza de impurezas, este neutrón puede encontrarse con un núcleo de  $U_{238}$ , con uno de  $U_{235}$  o con un núcleo de moderador. En cualquiera de los dos primeros casos puede ocurrir uno de los siguientes procesos:

- 1.º Absorción sin escisión.
- 2.º Escisión.
- 3.º Choque elástico.
- 4.º Choque inelástico con pérdida de energía.

Observando el cuadro de secciones eficaces, se deduce que para el  $U_{235}$  la sección eficaz con respecto a los procesos 1.º y 2.º es pequeñísima y como, además, hay poca proporción de él, la probabilidad de que se presenten estos procesos será despreciable.

El  $U_{238}$  tiene también poca sección eficaz de absorción y de escisión.

El choque de este neutrón rápido con ambos uranios no le hace perder energía, debido a su gran masa nuclear con relación a la del neutrón; seguirá siendo, por consiguiente, rápido.

El deuterio da lugar a choque elástico con pérdida de velocidad en el neutrón.

La probabilidad de captura de un neutrón es, por lo tanto, escasa, y también lo es la de escisión, y puede suponerse que la pérdida o ganancia de neutrones en esos procesos se compensan, por lo que no varía el número total de neutrones rápidos. En lo que se refie-



re a su velocidad, el deuterio se encarga de ir la reduciendo.

A medida que decrece la energía del neutrón va apareciendo un nuevo fenómeno: el de la resonancia. Para ciertas bandas de energías, presenta el  $U_{238}$  bruscamente una elevadísima sección eficaz de captura (5.000 Barn) muy superior a la que presenta con neutrones rápidos, por lo que hay peligro de que disminuya el número de ellos considerablemente.

Tras sucesivos choques en los núcleos del moderador, los neutrones llegan a ser lentos, estabilizándose su energía en la media de agitación térmica (a 20° será de 1/4 o e. v., velocidad 2.200 m. por segundo), y por choques ya no pueden ganar ni perder energía.

La sección eficaz de escisión del  $U_{235}$  crece enormemente para esta energía de los neutrones, y en este proceso está la esencia del funcionamiento de la pila.

Estos neutrones pueden encontrarse con:

1.º Agua pesada (sección eficaz muy baja respecto a choques elásticos y a captura).

2.º  $U_{235}$  (gran sección eficaz para la escisión).

3.º  $U_{238}$  (poca sección eficaz para el choque elástico o para la absorción sin escisión).

El procedimiento cuantitativo que pueden presentarse para las distintas energías de los neutrones proporcionan los datos necesarios para resolver el problema fundamental de la pila atómica: conocido el número de los neutrones rápidos inicial, calcular los que se convierten en térmicos y, de éstos, los que producen escisión.

Si inicialmente hay N neutrones rápidos y de ellos  $N_1$  llegan a térmicos, de los cuales  $N_2$  dan lugar a escisión y nacen  $N_3$  neutrones rápidos, el factor de multiplicación vendrá dado por  $K = N_3/N$ .

Todo el cálculo teórico de la pila heterogénea se basa en la condición de que el factor de multiplicación sea ligeramente superior a la unidad (reacción en cadena poco divergente).

Como las variables que lo determinan son de tipo experimental, se comprende la dificultad que entraña el cálculo de una pila atómica y, como consecuencia, su realización.

El reflector juega un papel muy importante al per-

## REPARTO MUNDIAL DEL URANIO

Mineral	Composición	% de U.	Países
Pecblenda (Uraninita) ....	Óxido de Uranio y mezcla compleja	30 a 80	Checoslovaquia, Inglaterra, Estados Unidos, Congo Belga, Canadá.
Broguerita .....	Óxido de Uranio y de Thorio	?	Noruega, EE. UU.
Torianita .....	Óxido de Th y de Uranio	10	Ceylán.
Becquerelita .....	$UO_3, 2 H_2O$	72	Congo Belga.
Curita ..	$2 PbO_2, 5 UO_3, 4 H_2O$	55	Congo Belga.
Casolita .....	$3 PbO, 3 UO_3, 3 SiO_2, 4 H_2O$	40	Congo Belga.
Sodita .....	$12 UO_2, 5 SiO_2, 14 H_2O$	72	Congo Belga.
Torita .....	—	9	Noruega.
Autonita .....	$Ca, 2 UO_4, 2 PO_4, 8 H_2O$	50	Portugal, Tonkín.
Calcolita .....	$Cu, 2 UO_2, 2 PO_4, 8 H_2O$	50	Inglaterra, Portugal.
Carnotita .....	Vanadiato de $UO_2$ y de K hidratado	50	EE. UU.
Ferganita .....	Compuesto de $UO_2$ y de $U_2 O_5$	50	Turkestán.
Samarsquita .....	Niobiato y tantarato de tierras raras	3 a 15	U. R. S. S., EE. UU., India, Madagascar.
Euxenita .....	Niobiato y titanato de tierras raras	3 a 15	Noruega, EE. UU., Madagascar.
Betafitita .....	Titanoniobiato y tantarato de Uranio	25	Madagascar.



mitir reducir las dimensiones del reactor. Consta de una envuelta en la que chocan elásticamente los neutrones y vuelven al reactor para ser capturados. Un espesor excesivo de reflector es antieconómico, ya que, a partir de uno determinado, su efecto es prácticamente el mismo.

Los minerales de uranio se encuentran bastante repartidos en el mundo.

En el cuadro de la pág. 17 se indican los minerales de uranio más importantes con sus riquezas en aquel elemento y los lugares de la Tierra en que se encuentran.

En España hay también minerales de uranio, principalmente en las provincias que se citan a continuación:

Córdoba.—Es la que posee las venas de uranio más importantes de las conocidas hasta ahora en España. Están localizadas en los términos municipales de Fuenteovejuna y Hornachuelos.

Badajoz.—En esta provincia existe pecblenda en Monasterios, Fuente de Cantos, Segura de León,

Cáceres,

Almería,

Barcelona,

Huesca,

Madrid.

Los minerales de uranio han de sufrir varios tratamientos antes de poder ser utilizados en las pilas.

Los problemas técnicos que se presentan en estos tratamientos son de gran consideración, y las soluciones que se les han dado han supuesto un gran progreso en los métodos de la industria química.

Para que la reacción en cadena en las pilas atómicas sea posible, es necesario conseguir uranio de una gran pureza. Es preciso eliminar primeramente todas las impurezas susceptibles de capturar neutrones, y, luego, transformar los compuestos de uranio obtenidos en metal puro.

Las dificultades que lleva consigo hizo el que se pensara en utilizar algún compuesto de uranio, en lugar de metal puro, y, así, la pila atómica francesa emplea el menos oxigenado de los óxidos del uranio.

La obtención del  $\text{UO}_2$  se hace a partir del  $\text{U}_3\text{O}_8$ , como materia prima. El  $\text{U}_3\text{O}_8$  se obtiene con faci-

dad de los minerales de uranio con un grado de pureza que viene a ser del 3 ó 4 %.

El principio del método de purificación es sencillo y está basado en el hecho de que algunos de los compuestos de uranio tienen propiedades características que no posee casi ningún otro elemento. En particular, el nitrato de uranilo es uno de los pocos nitratos solubles en disolventes orgánicos, y el peróxido de uranio es uno de los pocos insolubles en medio ácido.

El enorme grado de pureza exigido puede conseguirse por una extracción del nitrato de uranilo por medio de éter etílico, y esta pureza se mejora todavía al precipitar el peróxido formado, añadiendo agua oxigenada.

Las etapas sucesivas consisten en transformar el material de partida en nitrato, por ataque con ácido nítrico, hacer pasar el nitrato de uranilo por un ciclo de extracción por éter y de reextracción por agua, transformar luego el nitrato en peróxido de uranio  $\text{UO}_4$ , por una precipitación con agua oxigenada y, por último, calcinar a  $300^\circ$  el peróxido  $\text{UO}_4$ , que se transforma en  $\text{UO}_3$  y que se reduce, a su vez, en atmósfera de hidrógeno, para terminar formando el  $\text{UO}_2$ .

Este método de obtención, fácil en teoría, lleva consigo enormes complicaciones de orden técnico. La producción de una fábrica de este tipo se caracteriza por la pureza extraordinaria que se exige al producto final, ya que determinados elementós, tales como el boro, cadmio, litio, etc., deben de ser eliminados en grado tal que la industria química no había conseguido alcanzar. Esto exige múltiples precauciones: todos los útiles han de ser de acero inoxidable, las salas de trabajo deben de estar provistas de clima artificial y de máquinas para la absorción del polvo, los obreros han de tener en los talleres cuidados análogos a los necesarios en los quirófanos.

Una vez obtenido el  $\text{UO}_2$ , es necesario llevarlo a la forma más densa posible; esto se consigue haciendo la reducción en la atmósfera de hidrógeno a la temperatura de  $650^\circ$ .

Las barras de la pila están constituidas por tubos de aluminio rellenos de óxido de uranio; el obtenido en el proceso indicado anteriormente tiene aspecto de polvo fino. Es imposible comprimir este polvo eficazmente en el interior de los tubos para conseguir la densidad requerida, por lo que se hace necesario fa-



bricar comprimidos de óxido de uranio de suficiente resistencia metálica y de la mayor densidad posible.

Se han conseguido estos comprimidos por cocción del polvo de  $UO_2$  en atmósfera convenientemente escogida (reductora o neutra) y a una temperatura de cerca de  $1.600^\circ$ . En esta cocción la masa sufre gran retracción.

## DIVERSAS APLICACIONES DE UNA PILA

Las múltiples aplicaciones que tiene una pila se pueden resumir en un cuadro tal como el que se adjunta en la página siguiente.

En el campo de la industria las aplicaciones más importantes son las referentes a:

- a) Aparatos automáticos de medida.
- b) Vigilancia de fabricación.
- c) Mejora del método operatorio.

Un ejemplo de regulación automática de la fabricación podría ser el del espesor de los hilos en una fábrica de hilos de celulosa, tal y como se ve en la figura 7:

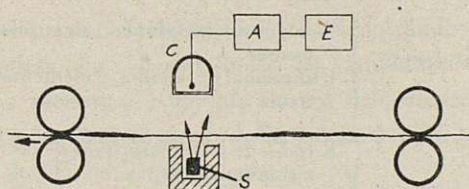


Fig. 7

en la cual, C es un contador de partículas, A su amplificador y E un artificio mecánico que traduce el impulso eléctrico en medida del espesor del hilo.

Se comprende que, al aumentar el espesor, disminuye el número de partículas que llegan al contador, y, por lo tanto, actuará el artificio mecánico convenientemente reglado para los límites de tolerancia del espesor.

Otra aplicación podría ser añadir una sustancia radioactiva artificial a un tinte, y detectar después con un contador la proporción en que el tinte se ha fijado. Se puede conseguir también comprobar automáticamente el azufre que tiene un tejido, etc.

Pueden emplearse sustancias radioactivas para me-

dir la concentración de un producto disuelto en un líquido no corrosivo ni inflamable, y también para determinar el nivel de un líquido en un depósito, etc.

En las operaciones industriales a gran velocidad, la forma de eliminar las cargas eléctricas creadas por frotamiento es ionizar la atmósfera por medio de emisión alfa.

Ciertos elementos artificiales emiten radiación gamma, muy ventajosa con respecto a los rayos X, para el examen de piezas soldadas, con objeto de detectar grietas, fisuras, etc.

El cobalto 60, radioactivo artificial de la pila, permite radiografiar 40 cm. de espesor, y Ford ya lo emplea en su industria, substituyendo a un tubo de rayos X de millones de voltios.

Pueden dar información los neutrones sobre la estructura de las combinaciones químicas de igual manera que la radiación X. Esta aplicación es interesantísima.

Cantidades infinitesimales de sustancias radioactivas pueden localizarse, y en metalurgia esta localización microscópica tiene gran interés. Veamos algunas de sus posibilidades:

### a) Autodifusión.

Sobre un bloque de cobre, por ejemplo, se puede depositar en una de sus caras cobre radioactivo, y calentando durante un cierto tiempo, estudiar la presencia del cobre superficial en el interior de la masa, por medio de cortes o con la muela, y así conocer la autodifusión que se ha producido. Este estudio tiene interés en el caso de cobre, cinc, plata, oro, hierro, etc.

### b) Fricción y lubricación.

Las trazas de un metal que frota contra otro se pueden poner en evidencia con metales radioactivos, para lo que basta un  $10^{-10}$  de gramo.

Una de las superficies se hace radioactiva y después se mide la presencia del metal de ésta en la otra.

La eficacia de un aceite lubricante se puede conocer haciéndolo radioactivo, lavando el me-



## DIVERSAS APLICACIONES DE UNA PILA

Calor .....		1 Kg. de U 235 produce el mismo calor que 3.000 Tn. de carbón.	
ENERGÍA NUCLEAR	Neutrones, rayos $\gamma$ .....	Física nuclear.....	<ul style="list-style-type: none"> <li>Teoría del núcleo.</li> <li>Nuevas reacciones nucleares.</li> <li>Estudio de las radiaciones.</li> </ul>
		Biología.....	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acción de las radiaciones sobre los tejidos animales y vegetales.</li> <li>Terapéutica por radiaciones.</li> <li>Protección contra las radiaciones.</li> </ul>
		Química .....	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nuevas reacciones químicas por eje. polimerización para obtener materias plásticas.</li> <li>Estudio de los cristales por los neutrones.</li> </ul>
		Industria .....	Radiografía de las piezas metálicas por rayos $\gamma$ .
		Productos radioactivos .	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permeabilidad de los tejidos de las células, coagulación de la sangre, anemia.</li> <li>Estudio de los músculos y de los nervios.</li> <li>Fisiología del hígado y riñón.</li> <li>Fisiopatología de la glándula tiroides.</li> <li>Fisiología de las glándulas endocrinas.</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Biología animal .</li> <li>Metabolismo .                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Fósforo, Azufre, Sodio y Potasio.</li> <li>Cloro, Bromo, Cobre, Oro, Arsénico.</li> </ul> </li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Choque traumático.</li> <li>Cáncer.</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Terapéutica de las afecciones sanguíneas.</li> <li>Cáncer.....                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicaciones diagnósticas.</li> <li>Terapéutica.</li> </ul> </li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Biología vegetal .</li> <li>Utilización de abonos y elementos nutritivos.</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Física y Química.</li> <li>Estudio de los mecanismos de las reacciones químicas.</li> <li>Dosificaciones sensibles de ciertos compuestos.</li> <li>Difusión, absorción.</li> </ul>
			<ul style="list-style-type: none"> <li>Metalurgia.....</li> <li>Estudios teóricos.</li> <li>Vigilancia de fabricación.</li> </ul>
			Aplicaciones industriales diversas.
Productos de la explotación	Producción en grandes cantidades de productos radioactivos .....	Indicadores radioactivos .....	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Localización. Eliminación.</li> <li>Mecanismo de los reactores.</li> </ul>	

PU ... Permiten la construcción de pilas o reactores de pequeño tamaño y gran potencia.

Tomado de "Atomes"

tal impregnado y viendo la película que aún queda en él con un contador, así como el metal que hay en el aceite.

La pila, por medio de los productos radioactivos que de ella puedan obtenerse, presta también grandes servicios a la Biología.

Preparando elementos radioactivos artificiales, tales como H, C, P, S, Cl, I, Na, K, Ca, Fe, Cu, Zn y Co, que son esenciales para la vida, y sabiendo que éstos tienen las mismas propiedades químicas que los no radioactivos, tienen sin embargo la ventaja de que se pueden localizar en el organismo en cualquier mo-



mento, con lo que se abren horizontes insospechados dentro del campo de la Biología.

Tenemos algunos problemas interesantísimos:

- a) Para medir velocidades de absorción digestiva del sodio.
- b) Absorción cutánea por medio de pomadas radioactivas.
- c) Medición del tiempo durante el que los glóbulos rojos, que tienen hierro radioactivo, de una transfusión son aprovechados por el enfermo.
- d) Ciertas células presentan afinidad por radioelementos, y de aquí las comprobaciones en el tratamiento de personas, por ejemplo: tiroides con yodo, huesos con calcio, cáncer con fósforo, etc.

En general, según fijen una sustancia más o menos de lo normal, se pueden localizar perfectamente.

Otra interesante aplicación de las pilas atómicas es la obtención de un nuevo elemento químico, el plutonio, que es la base de todas las aplicaciones futuras, militares y pacíficas, de la energía nuclear.

Es el primer elemento que, no encontrándose en la Naturaleza, ha sido producido en cantidad por la química moderna, y aunque no sea oro, dentro de algunos años será el signo de la potencia y de la riqueza de los Estados que lo posean.

El uranio está compuesto de dos isótopos, el 235 y el 238. El isótopo 235 es el más raro, solamente 1/140 de la mezcla. Razonamientos teóricos han demostrado, y se ha comprobado experimentalmente, que el uranio 235 era el responsable de la escisión, mientras que el uranio 238 parecía ser un genio maléfico en la posibilidad de reacción en cadena, a partir del uranio natural, pues capturaba una cierta cantidad de neutrones que se perdían en el proceso de multiplicación.

Era, pues, necesario separar ambos isótopos, lo que suponía enorme gasto de dinero y energía, como se desprende de la observación de los distintos procedimientos de separación que se indican a continuación y que sirven también para la separación de isótopos, en general:

- 1.º Espectrógrafo de masas.
- 2.º Difusión a través de una pared porosa.

3.º Termodifusión.

4.º Centrifugación.

El espectrógrafo de masas consiste en un acelerador de iones del cuerpo que se quiere separar, los que son desviados por la acción conjunta de un campo magnético y otro eléctrico. Sobre una placa se obtienen las trazas de cada uno de los isótopos en cantidades casi microscópicas. Aún así, los norteamericanos solventaron esta dificultad poniendo en funcionamiento más de 15.000 espectrógrafos, con lo que consiguieron producir la cantidad que necesitaban de uranio 235, puro.

El método de difusión a través de una pared porosa es el más cómodo, y consiste en sucesivas difusiones a través de dicha pared, ayudada por diferencias de presión. La mezcla se va enriqueciendo cada vez más en el menos pesado de los isótopos. En el caso del uranio se emplea el fluoruro de uranio que es gaseoso. El porcentaje en  $U_{235}$  va aumentando en la proporción.

$$\frac{\left(\frac{n}{n} \frac{235}{238}\right)_1}{\left(\frac{n}{n} \frac{235}{238}\right)_0} = \sqrt{\frac{M_s}{M_t}} = \sqrt{\frac{352}{349}} = 1.0043$$

En X veces que se haga la operación, el enriquecimiento es de  $1.0043^x$ .

Como la riqueza del fluoruro de uranio es sólo el 7 %, si se quiere una concentración final del 70 %, resultan necesarias un número de operaciones de

$$x = 1073$$

El uranio 235 obtenido por este procedimiento fué el usado en la bomba atómica de Bikini; actualmente se emplea el plutonio.

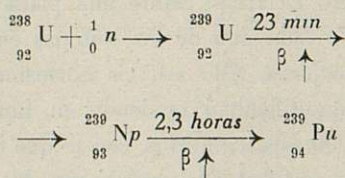
El método de termodifusión se funda en los fenómenos de difusión con gradiente de temperatura.

El inconveniente de tener que separar los dos isótopos del uranio quedó solventado con el descubrimiento que, en 1940, hicieron McMillan y Abelson de que el uranio 238, por captura de un neutrón, puede dar lugar a un nuevo elemento, el plutonio, que es escindible como el uranio 235 y que se separa fácilmente del resto de la masa del uranio.

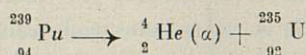
La reacción que tiene lugar es la siguiente: el  $U_{238}$ , por captura de un neutrón, da lugar a un isótopo de



uranio cuya vida es solamente de 23 minutos, porque, al cabo de este tiempo, se desintegra en un isótopo del nuevo elemento 93 (que ahora se llama neptunio), que al cabo de 2,3 horas da lugar al plutonio por desprendimiento de radiación:



Es interesante hacer notar que el plutonio es el padre radioactivo del  $\text{U}_{235}$ , ya que se desintegra en un período de 24.000 años según la reacción



El descubrimiento del plutonio tuvo gran importancia, ya que si se podía conseguir hacer funcionar la reacción en cadena en el uranio natural, sería posible formar por transmutación a partir del  $\text{U}_{238}$ , plutonio, que podría separarse sin grandes dificultades.

Las fábricas de extracción del plutonio son fábricas químicas de un género completamente nuevo, con mandos a distancia. Las barras de  $\text{UO}_2$  son sacadas de las pilas al cabo de un cierto tiempo y luego se tratan en una especie de cañón de algunos centenares de metros de largo, entre muros de hormigón de varios metros de espesor, donde, por una serie de ciclos de operaciones químicas basadas en los diversos grados de oxidación del plutonio, este elemento se separa finalmente del uranio y de los productos radioactivos, cuyas radiaciones son tan intensas que ningún ser humano debe aproximarse a ellos.

Jamás la industria se había encontrado con un problema parecido. Las instalaciones de alta tensión, los talleres de gases asfixiantes, o las fábricas químicas que trabajan con altas presiones son maniobradas a distancia, pero se puede siempre cortar la corriente, vaciar las cisternas o hacer caer la presión antes de proceder a una reparación. En el caso de las fábricas radioactivas, todas las reparaciones son absolutamente imposibles después de que han empezado a funcionar.

Una vez que se ha separado el plutonio, es necesario purificarlo, para poder fabricar la bomba, trabajo

que es muy delicado, pues el plutonio es mortal, si el organismo lo fija en los huesos o en los riñones en menos de una centésima de miligramo, y son necesarios varios kilos para una sola bomba.

Una pila de un kilowatio produce entre 0,6 y 2 miligramos de plutonio por hora, y la cantidad obtenida es proporcional a la potencia de la pila.

Respecto a las intensidades de radiación, se puede decir que son muy grandes durante el funcionamiento de la pila, y que al pararse, estas radiaciones van decreciendo rápidamente, de forma que al cabo de un mes se reduce a una intensidad penetrante equivalente en gramos de radio a 10 veces el número de kilowattios de potencia a la cual funciona la pila.

Antes de tratar las barras es preciso esperar un mes, por lo menos, después de sacarlas de la pila, con objeto de que decrezca la intensidad de radiación.

A continuación hay que resolver el problema de separar el plutonio de la masa de uranio y de los productos radioactivos de la escisión.

La concentración de plutonio es del orden de  $10^{-6}$ , pero no es difícil separarlo del uranio, ya que, químicamente, se diferencia mucho de él.

Al disolver la mezcla en  $\text{NO}_3\text{H}$  y añadir ácido fluorhídrico, precipita fluoruro de plutonio insoluble, mientras que el uranio permanece en disolución. Otras muchas reacciones distinguen a éstos elementos.

Los principales productos de la escisión son radioisótopos de Xe, Sr, Ba, La, Y, Ce, Zr, Ru.

Es preciso, ante todo, desembarazarse totalmente de los emisores de rayos  $\gamma$ .

Se hace la separación por medio de disoluciones y precipitaciones sucesivas que van concentrando el plutonio por eliminación de los productos de la escisión.

Otros procedimientos de obtención por vía seca, absorción, etc., no han sido todavía puestos a punto y con ellos se podría realizar la extracción en forma continua, mucho más fácil de dirigir a distancia.

No se conocen con detalle las soluciones dadas a los enormes problemas técnicos que presenta la producción del plutonio, y que ya han sido en parte indicadas al hablar de las pilas atómicas. Uno de los mayores problemas es el de la protección del personal contra las radiaciones peligrosas.



Para reducir en un factor de 10 la radiación de los productos de la escisión, son necesarios 5 ó 6 cm. de plomo o 30 cm. de hormigón; se comprende que se utilicen muros de, por lo menos, 1 m. de espesor que protegen a los operarios, quienes no pueden seguir las operaciones más que por medio de telescopios y aparatos de visión a distancia.

Otra dificultad estriba en que los productos de la escisión no utilizables no pueden ser arrojados impunemente en los alrededores de la fábrica, por los peligros que representa de aumentar el poder radioactivo de las aguas, que podría tener consecuencias biológicas. Actualmente se arrojan en pozos de hormigón. Es tal su peligro que se ha pensado en utilizarlos, en caso de guerra, como venenos radioactivos que harían inhabitables las regiones o ciudades sobre las que se arrojaran.

## REACTORES NUCLEARES PARA LA PROPULSIÓN DE AERONAVES

El combustible atómico es raro y costoso, pero tiene una gran concentración energética. Debe utilizarse en aquellas cuestiones de las que se espera un alto rendimiento, y no en las formas vulgares y más difundidas de la producción de energía. También en aquellos casos en que los resultados pueden mejorarse exclusivamente utilizando muy altas concentraciones energéticas.

En aviación un combustible de la naturaleza del atómico puede proporcionar alcances ilimitados. Sin embargo, la gasolina da alcances suficientes para la mayoría de los fines, siempre que no se quieran grandes velocidades. En esta combinación de altas características y gran alcance es donde la propulsión atómica promete mejorar los resultados, imposibles de obtener por otros medios.

El peso total de la aeronave en función del alcance que espera alcanzarse viene representado en la figura 8. En ella puede verse que, a partir de un radio de acción determinado, el único tipo de propulsión posible es el atómico.

Para utilizar la energía atómica en aviones se han ideado distintos procedimientos (aunque ninguno haya sido, que sepamos, llevado a cabo), todos de tipo

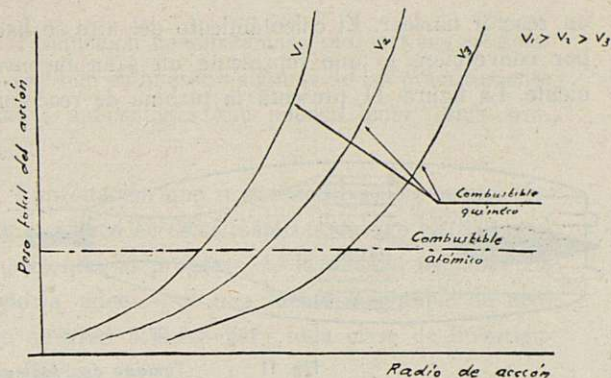


Fig. 8

térmico, ya que la energía liberada en la escisión es de este tipo.

El primer ejemplo de un sistema térmico es el indicado en la figura 9. Es una turbina de ciclo cerrado y puede ser de vapor o de mercurio. El vapor se produce en el reactor nuclear por el calor allí desprendido, y, luego, se expande en la turbina que manda la

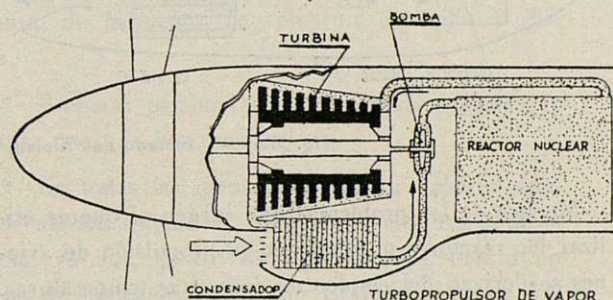


Fig. 9 Tomado de "Atomes"

hélice. La necesidad de usar hélice y disponer de un condensador, limita bastante la velocidad máxima que puede alcanzarse en un avión provisto de un reactor de este tipo.

La figura 10 muestra un turbo-reactor de energía atómica. Es igual que los conocidos actualmente, en los que se ha substituido la cámara de combustión por

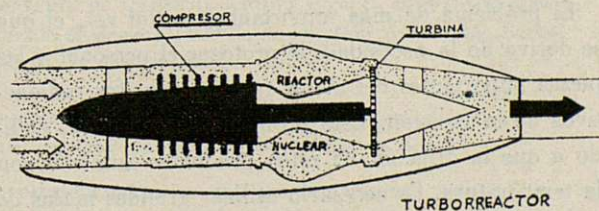


Fig. 10 Tomado de "Atomes"



un reactor nuclear. El calentamiento del aire se hace por convección, lo que representa un gran inconveniente. La figura 11 presenta la turbina de reacción,

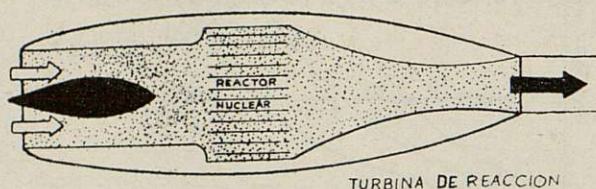


Fig. 11 Tomado de "Átomos"

de menor rendimiento que la anterior, por no hacer la previa compresión del aire.

La figura 12 da en esquema la forma de aplicar la energía nuclear a un cohete. Su funcionamiento no depende del aire atmosférico, por lo que puede operar fuera de la atmósfera terrestre.

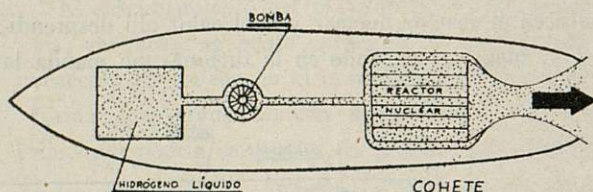


Fig. 12 Tomado de "Átomos"

Muchos de los problemas que surgen al querer utilizar los reactores nucleares en la propulsión de aviones se derivan del empleo de muy altas temperaturas. El calor producido en la reacción debe ser transferido al fluido actuante a través de superficies conductoras. La superficie interna del reactor debe, pues, de estar a una temperatura más alta que la mayor a que esté el fluido actuante. Afortunadamente, en el reactor no existen partes móviles, y sus elementos no están sometidos a esfuerzos importantes.

Otro problema es el de la protección del uranio en el reactor contra la corrosión por parte del fluido actuante.

El problema de más importancia es, tal vez, el que se deriva de la necesidad de proteger el personal y las piezas importantes del avión de los productos radioactivos de la escisión. Este problema se complica, debido a que la difusión de estos productos aumenta con la temperatura. Es necesario utilizar grandes masas de materiales protectores, lo que hace aumentar el peso.

Se conocen los materiales más adecuados para detener un tipo de radiación determinado.

Las radiaciones emitidas por un reactor nuclear son neutrones, rayos  $\gamma$ , principalmente. Cuando estas radiaciones atraviesan el blindaje, cambian su carácter gradualmente. Los neutrones que se desplazaban rápidamente van siendo frenados por sus choques con los núcleos del material que constituye el blindaje. Los rayos  $\gamma$  son absorbidos por electrones que, a su vez, emiten rayos X más blandos, y así sucesivamente. Un material que es adecuado para detener rayos  $\gamma$  puede no ser el mejor cuando se trate de detener aquéllos mezclados con neutrones; asimismo, un material adecuado para las partes interiores de un blindaje puede no serlo para las exteriores. Hay un gran campo para reducir el caso mediante un proyecto adecuado.

En lo que respecta a la construcción de un avión propulsado atómicamente, ha de hacerse con miras a la obtención de grandes velocidades, con objeto de aprovechar las ventajas que proporciona la energía atómica. Se tratará de aviones grandes, y han de estar provistos, para aterrizar, con peso igual al de despegue, ya que no hay prácticamente consumo de combustible. La tripulación ha de instalarse lo más lejos posible del grupo motopropulsor. Las necesidades de la estructura serán diferentes a la de los aviones actuales.

La resolución de todos estos problemas es difícil y no es de esperar que se consiga propulsar aviones o cohetes tripulados, por medio de energía atómica en un plazo próximo, ni siquiera en aquellos países que tienen ya una gran experiencia en materia de energía atómica. Antes será necesario poner a punto los procedimientos de aprovechamiento de la energía nuclear para la producción de calor o energía eléctrica y, más tarde, utilizar aquella energía en la tracción terrestre. Las experiencias sacadas entonces puede que permitan utilizar la energía atómica en la propulsión de aeronaves tripuladas.

En nuestro país es prematuro el querer abordar estos problemas, dado que todavía no se ha utilizado la propulsión por reacción, y que, sobre energía nuclear, se carece casi en absoluto de experiencia.

#### RESUMEN

Como resumen general, podemos decir que el coste de construcción de una pila heterogénea, utilizable



para la obtención de energía y de productos radioactivos artificiales, es elevadísimo, por las siguientes causas:

a) Preparación de personal especializado, tal como técnicos encargados de proyectar y construir la pila, a partir de los resultados previamente obtenidos por físicos investigadores.

Especialistas encargados de la vigilancia y regulación del funcionamiento de la pila y de su mantenimiento.

b) Coste de los materiales, difícilmente calculable *a priori*; por ejemplo, comprimidos de  $\text{UO}_2$  obtenido a partir del mineral. Agente moderador (agua pesada o grafito).

c) Accesorios de la pila. Equipos electrónicos de vigilancia y de mando a distancia.

d) Coste de construcción, debido a las mínimas tolerancias permitidas.

Se comprende que resulta casi imposible dar una cifra, ni siquiera aproximada, del precio total de construcción de una pila.

De poderse realizar esta colosal empresa, se podrían sacar de ella, en un plazo relativamente breve, grandes beneficios, como:

a) Energía térmica. Que sepamos, en las pilas actualmente existentes, el aprovechamiento de esta energía es difícil (transmisión de calor por conducción) y su utilización en este sentido no justifica la construcción de la pila. (= 15 Kw.)

b) Producción de sustancias radioactivas artificiales. Ya se han enumerado algunas de las prácticamente ilimitadas aplicaciones que pueden tener estos productos.

c) Capacitación que se conseguiría de personal técnico y científico en estas materias, lo que abriría nuevos horizontes al progreso de la técnica nacional. Se dispondría, además, de una fuente inagotable de neutrones de gran utilidad para toda clase de investigaciones físicas.

d) Fabricación de plutonio.

## CONCLUSIONES

1.º Ya que en España se dispone de yacimientos de uranio, debe de intensificarse todo lo posible la localización de nuevos yacimientos, y acometer la fabricación de uranio desprovisto de impurezas, así como la de comprimidos de óxido de uranio, de gran valor en el mercado internacional. Todo ello, aunque no se pensara, de momento, en construir una pila en España.

2.º Preparar personal para que pueda proyectar y calcular una pila heterogénea.

3.º En todas las escuelas especiales debería estudiarse alguna asignatura referente a esta rama de la ciencia, ya que, dentro de algunos años, tendrá un campo de aplicación ilimitado en toda clase de técnicas.

## BIBLIOGRAFÍA

El estado de la Física Nuclear dirigida a la obtención de la escisión de los núcleos, principalmente de uranio, puede conocerse consultando los artículos:

NUCLEAR FISSION, de L. A. TURNER, publicado en REVIEW OF MODERN PHYSICS, 12.1 (1940).

THE MISSING HEAVY NUCLEI, del mismo autor, y publicado en la misma revista, 17.292 (1945).

Es también famoso el libro:

ATOMIC ENERGY FOR MILITARY PURPOSES under the auspices of the United States Government - 1945, cuyo autor es H. D. SMITH.

Esta obra representa la «revelación del secreto» por parte de los norteamericanos.

En la lengua francesa pueden consultarse:

LA CONQUÊTE DE L'ENERGIE ATÓMIQUE, de G. DE VANCOULEURS, dedicado al número 1.000 de la colección ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES.

Otros artículos interesantes son los escritos por el primero que consiguió la escisión del núcleo de uranio:

SOME PARTICULARS OF THE ATOMS FROM THE NUCLEAR FISSION OF URANIUM AND THORIUM, de HAHN, publicado en ANNALEN DER PHYSIK, 36.368 (1939).



FURTHER PRODUCTS OF URANIUM DESINTEGRATION, de HAHN y STRASSMANN, publicado en NATURWISS, 28.253 (1940).

También merecen ser consultados los artículos:

DESINTEGRATION OF HEAVY NUCLEI, de N. BOHR, publicado en USPEKHI KHIM, 8.544 (1939).

RESONANCE CAPTURE OF NEUTRONS BY URANIUM, de ANDERSON, publicado en PHYSICAL REVIEW, 57.566 (1944).

Hay muchos libros dedicados a Física Nuclear y energía atómica que no están a la altura del tema que tratan. Otros, sin embargo, son interesantes, principalmente para el ingeniero, y entre ellos pueden citarse:

NUCLEAR PHYSICS, de BETHE o de FERMI.

NUCLEAR FISSION AND ATOMIC ENERGY, de diversos autores.

Los principales investigadores sobre Física Nuclear suelen escribir sus trabajos en las siguientes revistas:

PHYSICAL REVIEW ... .. Americana.

JOURNAL DE PHYSIQUE  
COMPTES RENDUS  
PHYSICA HELVETIA ACTA } Europeas.

En Francia se edita también una revista interesante, aunque un poco divulgadora: ATOMES, de la que el número 35 está íntegramente dedicado a la pila atómica francesa ZOE.

---

---

*Terminada la lectura de este trabajo, son aprobadas sus conclusiones.*

*A continuación se concede la palabra a D. José María Lorente, que da lectura al siguiente trabajo núm. 272:*



## N.º 272. - La velocidad del viento en España y Marruecos

Autor: D. JOSÉ MARÍA LORENTE

Meteorólogo

El estar destinado en la Biblioteca de la Oficina Central del Servicio Meteorológico Nacional nos ha dado ocasión de recibir con frecuencia —creciente en los últimos años— consultas acerca de la bibliografía que a la velocidad de los vientos en España y en el Marruecos español pudiera referirse. Entidades oficiales y particulares, ingenieros de nacionalidades varias y simples aficionados, todos deseaban saber dónde podrían obtener datos acerca de ese tema.

La dificultad para contestar esas consultas estaba en que un trabajo de conjunto relativo al mismo no existe, todavía, por las siguientes dificultades:

1.<sup>a</sup> El viento es un elemento variabilísimo de un punto a otro, y sería necesario, para conocerlo con detalle, montar un anemómetro en cada parcela de terreno, especialmente en las zonas montañosas, en las que cada ladera y cada cumbre ofrece características especiales.

2.<sup>a</sup> Los anemómetros que se empleaban hasta hace pocos años no eran registradores, sino de lectura directa, y ésta se realizaba solamente a algunas horas de cada día, dos o tres, rara vez más, y solamente en algunos observatorios de primer orden se disponía ya

de anemómetros registradores, es decir, de anemógrafos.

Sin embargo, después de nuestra guerra de liberación se han ido montando ya bastantes de aquellos aparatos, y hay instalados unos cuarenta; muchos de ellos en los observatorios creados por el Servicio Meteorológico Nacional para la información en los aeródromos o en los aeropuertos.

Los datos tomados en muchos de ellos desde 1940 hasta 1947 se han resumido en valores promedios o en tantos por ciento de frecuencia, en la publicación: «Climatología aeronáutica de España», I, editada en 1948 por ese Servicio. Publicación a la que pronto seguirá otra, la II, ampliación de la anterior.

Aparte de ella, hay varias monografías (véase la lista bibliográfica que va al final del presente trabajo).

Pero no queremos ofrecer aquí un estudio de detalles, sino, más bien, una visión de conjunto, pues ni las series de los datos que poseemos ni el tiempo apuradísimo que hemos tenido para redactar este ensayo, han permitido otra cosa.

Y para realizar ese estudio nos ha parecido que lo mejor era limitarnos al de la distribución de los va-



lores promedios de la velocidad del viento que se han obtenido, durante el período considerado, en los estudios climatológicos, como internacionalmente básico para establecer toda comparación, es decir, el de 1901 a 1930.

Esos valores promedios los calculó la sección de Climatología del Servicio Meteorológico y no los ha publicado todavía él mismo, pero ha autorizado para que aparezcan impresos por vez primera en la obra del Ingeniero de Montes D. Ernesto de Cañedo-Argüelles titulada: «Curso de Meteorología» (Madrid, 1947).

Como esos datos aparecen publicados en *recorrido total del viento por día* y son proporcionales a los que darían la velocidad media en kilómetros por hora o en metros por segundo —pues no habría más que dividirlos por 24 o por  $24 \times 60 \times 60$ , respectivamente—, los aceptamos tales como aparecen en los «Resúmenes (anuales) de observaciones meteorológicas» como índice de la velocidad media del viento, en cada mes y en el año, para cada localidad.

Estas localidades son, en su mayor parte, las capitales de provincia. La instalación de sus anemómetros se hallaba en casi todas en alguna torrecilla de algún edificio, no en campo abierto. La altura del aparato sobre el nivel del suelo era muy variable, y la reducción a un nivel típico o normal no ha sido realizada. Los cambios de emplazamiento del instrumento no han sido raros y no se conserva recuerdo claro de ellos, en algunos casos. Por todo esto, no pueden tomarse estas series de datos, sino como mera aproximación de lo que sea la verdadera realidad de la velocidad del viento.

No obstante, los datos así toscamente obtenidos permiten ya formarse idea de conjunto de la distribución de la velocidad del viento en España. Por ello, hemos señalado en mapas adjuntos los valores medios de esos recorridos totales diarios del viento en cada población de donde había datos y hemos trazado unas curvas —aunque sólo sean provisionales— que separan zonas de más viento de otras de más calmada atmósfera.

Examinado, ante todo, el mapa anual —y añadiendo, como se ha hecho en todos, los datos de Portugal, obtenidos de sus publicaciones para esos mismos años de 1901 a 1930— se destacan en nuestra península, en Marruecos español y en Baleares —Canarias necesita capítulo aparte— tres zonas principales de mayor

velocidad del viento. La primera es la galaico-cantábrica; la segunda, la de la cordillera carpeto-vetónica que se continúa por los Montes Universales y, siguiendo luego hacia el Este se refuerza en la cuenca del Ebro, en la costa catalana y, por prolongación, se extiende hasta la isla de Menorca; y la tercera, la de la costa mediterránea, que se manifiesta con gran violencia en el Estrecho de Gibraltar, en el Golfo de Cádiz y en gran parte de Marruecos español (fig. 1).



Fig. 1.— Recorrido medio normal del viento por día en Kms.

Es lo más curioso que en los mapas mensuales aparece repetida esa misma distribución de zonas casi sin variación alguna.

Las causas meteorológicas de esta distribución climática de los vientos son bastantes claras y conocidas. Los vientos del Oeste que azotan sin defensa posible contra ellos las costas cantábricas; esos mismos vientos que, o se vierten por la cuenca del Ebro y salen impetuosos por su estrecha desembocadura, o saltan desbordados y furiosos el murallón de la cordillera paralela a la costa de Tarragona; los mismos vientos del Oeste o del Noroeste que pasan al Norte de los Pirineos y se recurvan al final de ellos para recorrer con violencia en forma de tramontana el bajo Ampurdán, en Cataluña, o del Mistral, del Ródano, que llega a la isla de Menorca, no provista, como la de Mallorca, de una cordillera defensiva por el Norte; o los vientos del Sudoeste que penetran por las cuencas del Duero y del Tago y chocan con cierta violencia contra ambas laderas del murallón de la cordillera carpeto-vetónica, batiendo hasta la sierra de la Demanda; o,



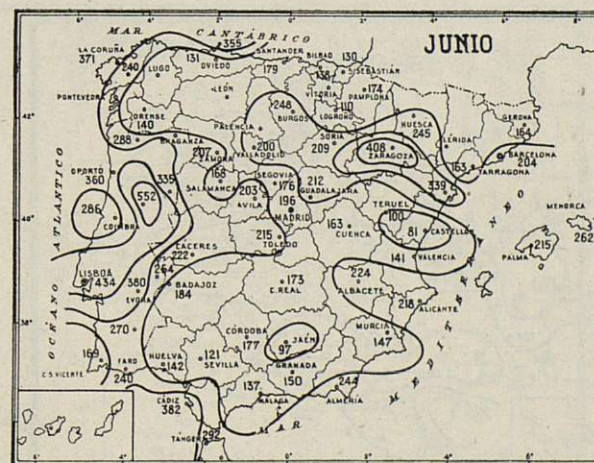
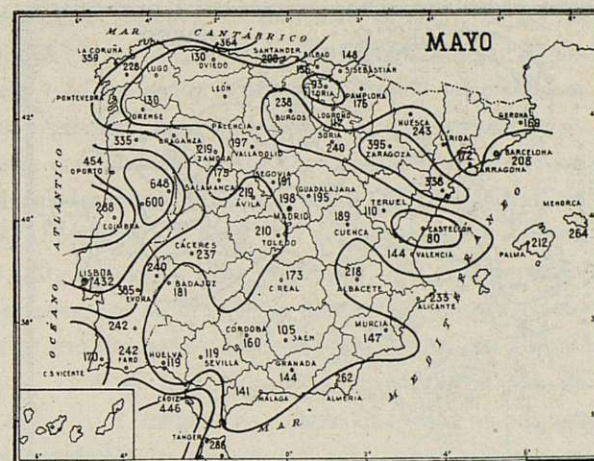
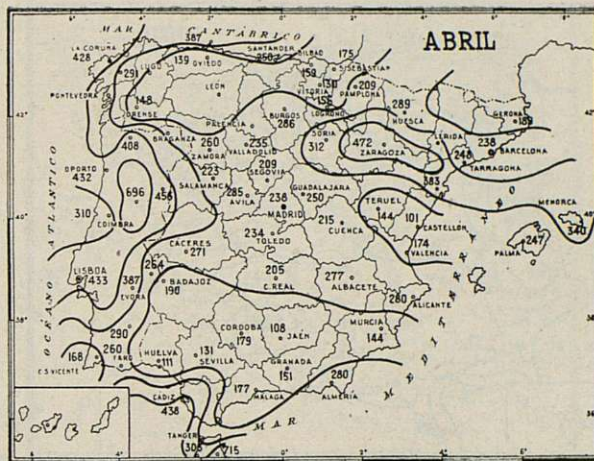
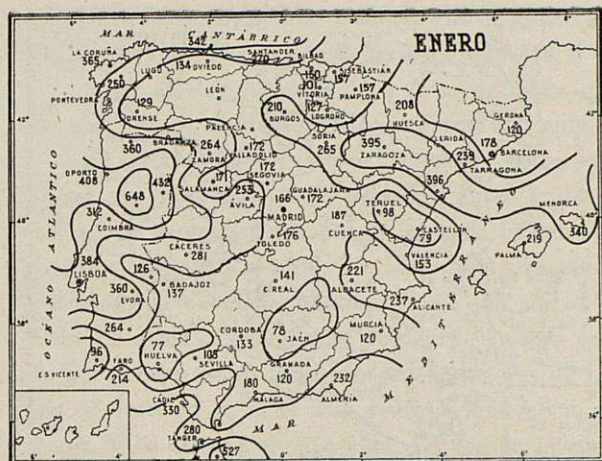


Fig. 2 a la 7.—Recorrido medio normal del viento por día en Kms.



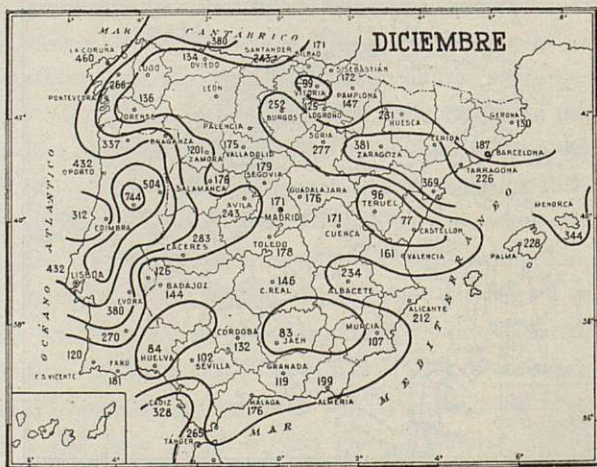
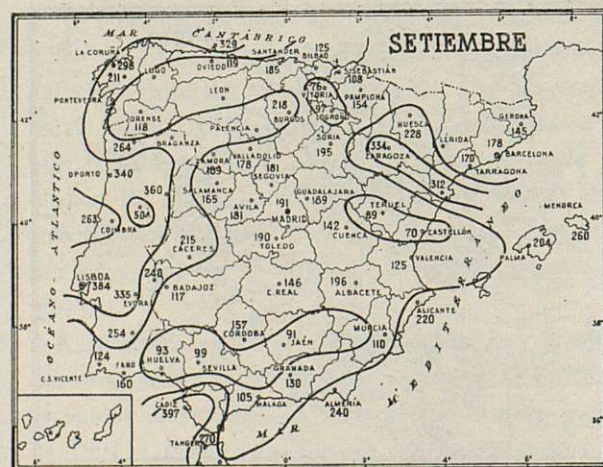
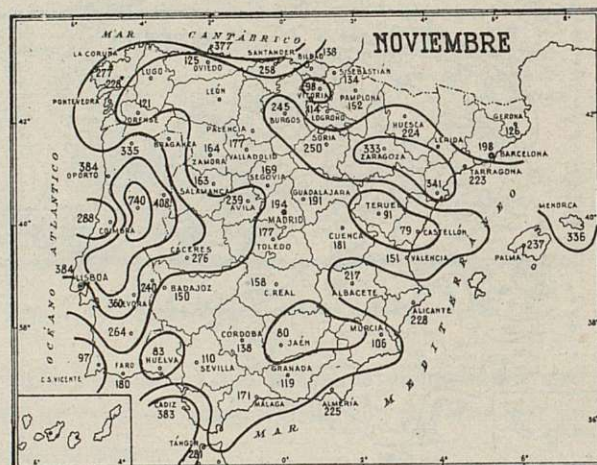
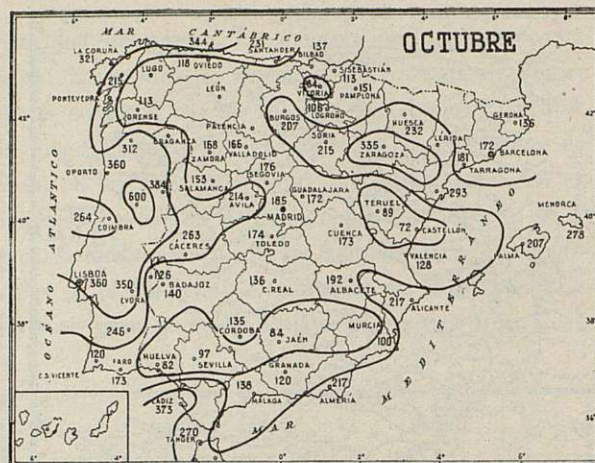
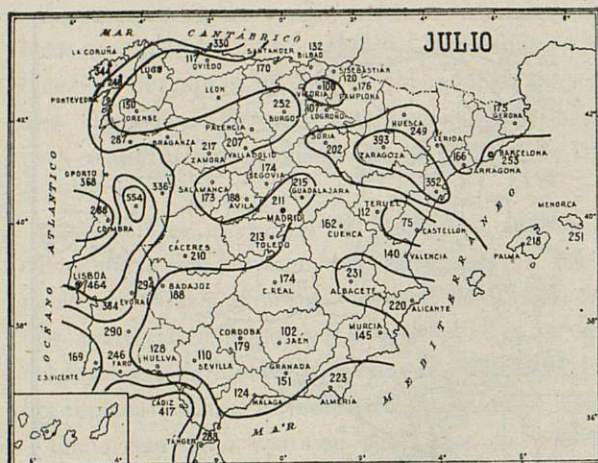


Fig. 8 a la 13.—Recorrido medio normal del viento por día en Kms.



finalmente, los vientos que obedecen, no a estas causas casi permanentes, sino a la formación temporal de la borrasca del Golfo de Cádiz o a su derivada que suele situarse en el Mediterráneo, frente a Alicante.

Un estudio mensual (véanse los mapas correspondientes) nos muestra —como decíamos antes— que la distribución de las velocidades es, en cada uno de los doce, muy semejante a la que ofrece el promedio anual. Pero confirma de modo bastante claro que marzo es —como lo sabía la experiencia popular— un mes ventoso por excelencia en gran número de lugares de España, si bien no es él el más ventoso, sino abril, su sucesor. Y en esto ya andaba algo equivocada la ciencia refranera.

Mes de velocidad mínima del viento lo es agosto, en el Mediodía de España, y septiembre en el Norte.

Con lo dicho se ha dado ya una vista panorámica de la distribución en el espacio y en el tiempo de las velocidades del viento en España. Pero no es posible contentarse —ni mucho menos— con tan somero estudio. Hay una serie de problemas de máximos de velocidades y de regularidad de las mismas que son de importancia capital en las aplicaciones que pudieran llegar a obtenerse de esta clase de investigaciones. También pudiera plantearse el problema de si hay grandes variaciones de esa velocidad en series largas de años, tales como las variaciones que parecen observarse en las lluvias.

En cuanto a los máximos de velocidad, se han hecho dos mapas: uno, el de las velocidades de máximo recorrido, observado durante los años del citado período internacional de 1901 a 1930; y otra, de las velocidades instantáneas máximas registradas ya en los modernos anemógrafos, instalados muchos de ellos con posterioridad a 1940.

En el primero se ha expresado la velocidad en kilómetros por hora —no en recorrido total en un día— y, claro, no es esa la velocidad instantánea, sino el promedio en una hora de ese recorrido total. Se destaca que en Huesca ha sido donde la velocidad fué la mayor registrada; siguen luego Santander, Burgos y La Coruña. Todas ellas con más de 100 kilómetros por hora como velocidad media en esos días más ventosos. En cambio, no llegan ni a 30 Murcia y Sevilla; y Huelva —como polo opuesto, en este sentido, de Huesca— no alcanza ni los 20, siquiera. Fig. 14.

En el segundo de los citados mapas aparecen las

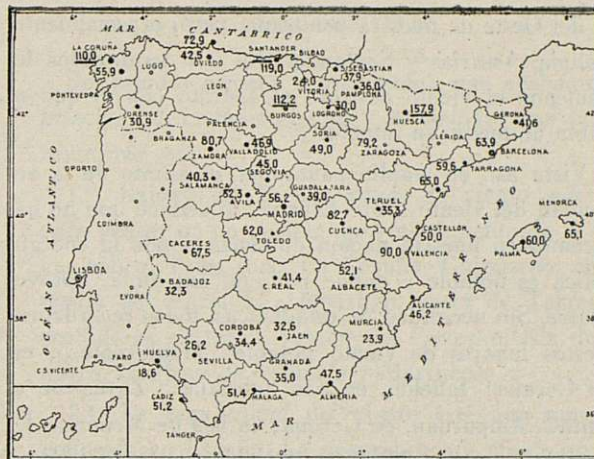


Fig. 14.—Velocidad media del viento en los días de mayor recorrido (período 1901-1930) Km/h.

velocidades instantáneas máximas, es decir, las de las ráfagas de más extraordinaria violencia que en un determinado momento, quizá en segundos solamente, se han registrado durante los años en que ha habido registro continuo del viento Fig. 15. Destacan en él las velocidades registradas en Iguelto (San Sebastián), de 180 kilómetros por hora; las del Ampurdán (Gerona), de 120; Zaragoza, 122; Santander, 130, etc., pero, sobre todas, las de la cumbre donde está situado el observatorio de Izaña (Tenerife), a 2.367 m. de altitud, en el cual se han llegado a registrar ráfagas de 216 km/h. Y téngase en cuenta que aquí no se pueden consignar las que se producirían en algunos casos extraordinarios, tales como en el del famoso huracán del 15 de febrero de 1941, que arrasó gran par-

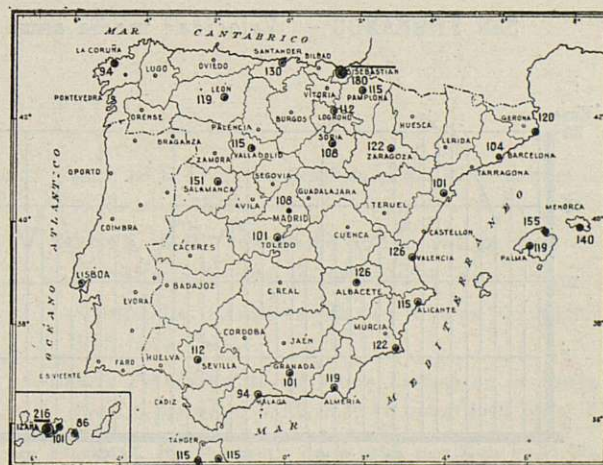


Fig. 15.—Velocidades instantáneas máximas Km/h.



te del Oeste de nuestra península, pero, especialmente, Galicia, Asturias y Santander. En tan desahorados fenómenos el viento destroza el aparato con el que se había de medir su ímpetu.

Visto así, en amplio panorama, el asunto de la velocidad del viento sobre España, se deduce que no carecemos en nuestra nación de zonas donde la energía eólica es notable y donde pudiera, sin duda, aprovecharse. Sin necesidad de estadísticas, todos recordamos ciertos lugares de viento notable: Monteventoso, en La Coruña; Igueldo, en San Sebastián; Zaragoza, el ventoso Ampurdán, en Gerona; la isla de Menorca, El Escorial, junto a Madrid; Atienza, en Guadalajara; Jaén, en determinados días; ambas costas del Estrecho de Gibraltar y Marruecos español, y, finalmente, las cumbres de la isla de Tenerife. Añadamos la costa de Tarragona.

Pero no hay que creer que estos sitios son los únicos donde sopla violentamente el aire. Son incontables más. Merecería la pena hacer un análisis de muchos de ellos, provincia por provincia, aun careciendo de datos anemométricos, valiéndose sólo de las referencias de los habitantes de cada uno de ellos y, muy especialmente, de la gente de campo que, por vivir mucho al aire libre o recorrer los montes, los conoce perfectamente.

Se nos ofrece ahora una dificultad. Ciertamente que hay muchos lugares de viento fuerte en España, pero no conocemos todavía su *regularidad*. Necesario es

estudiarla para determinar si es comparable a la que reina en las costas occidentales de Inglaterra y de Escocia, en las de Holanda y en las de Dinamarca, batidas por las constantes borrascas que vienen sin cesar del Atlántico, pues de nada serviría el viento fortísimo durante unos pocos días, si luego cesaba en los restantes del año.

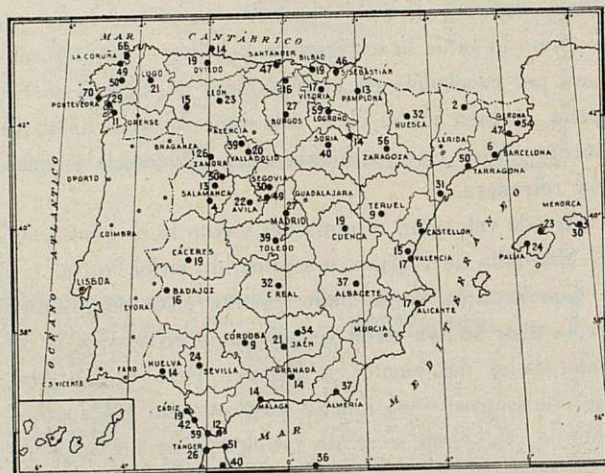


Fig. 16 — Porcentaje máximo de veces registrado en un mes de viento de velocidad entre 26 y 54 Km/h. (Período 1901-1930.)

Requería este estudio una estadística hecha —para su perfecto aprovechamiento con miras a la posibilidad de utilizar la energía eólica— por número de horas que sopla el viento de cada una de las velocidades. Esta estadística no existe todavía ni la pode-

#### SAN FERNANDO.— Velocidad media anual (en Kilómetros por hora) del viento

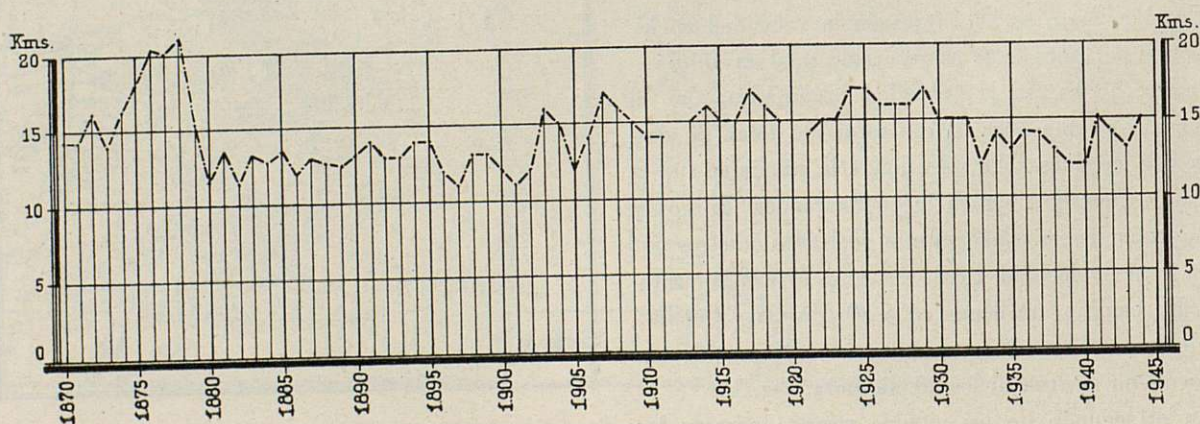


Fig. 17



mos improvisar. Se irá haciendo de aquí en adelante. Hay intentos de ello.

Sin embargo, algunos datos, a título de muestra aproximada, no sobrarán aquí. En La Coruña, por ejemplo, la velocidad media del viento en diciembre, el mes más ventoso, es de unos 45 o más km. por hora. Y en el mes de mayor calma relativa, que es septiembre, unos 30.

En San Fernando (Cádiz) oscila entre unos 25, como máximo, y 10, como mínimo.

Para toda España, y basándonos en los datos del período 1901 a 1930, podemos formar un mapa (véase al final) de porcentajes máximos de veces en que se han registrado vientos de 26 a 51 km. por hora. En él vuelven a destacarse las zonas que antes habían sido citadas: La Coruña, San Sebastián, Gerona, la costa tarraconense, el puerto de Navacerrada en la sierra de Guadarrama, Matacán (Salamanca) y la región del Estrecho de Gibraltar. Fig. 16.

Finalmente, tomando los datos del Observatorio de San Fernando (Cádiz), por ser el decano de los de España, añadimos un gráfico de la velocidad media anual del viento, expresada en km. por hora, en cada uno de los años que van de 1870 a 1944. En él se ve que, de 1875 a 1878, hubo un marcadísimo máximo, que, desde entonces, empezó a bajar esa velocidad hasta 1902, en que se elevó de nuevo para mantenerse por encima de los 15 km. por hora hasta 1930, y que, desde, entonces, volvió a caer de nuevo. Fig. 17.

## CONCLUSIONES

Del estudio somero y precipitado que acabamos de presentar deducimos algunas conclusiones que pueden resumirse así:

1.<sup>a</sup> Existen en España *zonas de viento suficiente* para pensar en un posible aprovechamiento de la energía eólica. Tales son: La Coruña, Guipúzcoa, cuenca media del Ebro, El Ampurdán, costa de Tarragona, cordilleras centrales, región del Estrecho, isla de Menorca, cumbres de Tenerife y Marruecos.

2.<sup>a</sup> La *regularidad* del viento está aún muy mal conocida en España. La general de un año a otro varía en un 25 por 100, aproximadamente, con respecto al valor medio en San Fernando (Cádiz), tomado como punto de referencia por su larga serie de observaciones.

3.<sup>a</sup> Es imprescindible extraer —hasta donde sea posible— de los datos existentes una *estadística* del número de horas que soplan los vientos con determinadas velocidades en los lugares de mayor interés. El mismo Servicio Meteorológico Nacional y también el Instituto Nacional de Geofísica, en su sección de Meteorología Aplicada, pueden realizar esta labor.

4.<sup>a</sup> Es necesario sugerir al Servicio Meteorológico Nacional la necesidad de montar gran número de *anemógrafos* en los lugares dignos de interés y, quizá, la formación de una *brigada móvil* que vaya recorriendo las costas y las cumbres para determinar los puntos de mejores condiciones de viento.

## BIBLIOGRAFÍA

- CLIMATOLOGÍA AERONÁUTICA DE ESPAÑA, I (Madrid, 1948) (publicación serie D, núm. 6 del Servicio Meteorológico Nacional).
- JANSA, J. M.—Contribución al estudio de la tramontana en Menorca (ídem íd., serie A, núm. 3).
- JANSA, J. M.—Notas para una climatología de Menorca, Vientos (ídem íd., serie A, núm. 4).
- PITA, Pío.—El huracán de 15 de febrero de 1941 (Revista de Aeronáutica, Madrid, febrero 1941).
- RICO SINOBAS, M.—Estudio del huracán que pasó sobre una parte de la Península española el día 29 de octubre de 1842 (Valladolid, 1853).
- VENTOSA, V.—El huracán de Madrid (12 de mayo de 1886) («Crónica Científica», IX, págs. 273 a 282).
- ANÓNIMO.—La tramontana (Revista General de Marina, Madrid, junio 1945).
- GARCÍA FERNÁNDEZ, J.—El viento Levante en la provincia de Cádiz («Agricultura», IX, núm. 31, marzo 1943, págs. 101-111).
- FONTSERÉ, E.—Desarrollo de la brisa marítima en el litoral de Barcelona (Memorias R. Acad. Ciencias, Barcelona, XI, Memoria 26).



- FONTSERÉ, E.—Sobre los primeros resultados obtenidos en el anemómetro de aspiración del Observatorio de Fabra (Barcelona) (Mem. R. Acad. Ciencias, Barcelona, X. Mem. 28).
- FONTSERÉ, E.—Sobre els vents estivals de convecció a la costa catalana (Barcelona, 1918).
- FONTSERÉ, E.—La Tramontane et le Mestral de la Côte Catalan (Archiv. für Meteorologie, Gephysik und Bioklimatologie, Viena, Band. I, 2, Heft, 1948, págs. 127-137).
- VIDAL, J. M., y POTAU, M.—La rafagosidad del viento en Prat de Llobregat (Barcelona) (Rev. de Geofísica, Madrid, 1946, V, oct-dic.).
- JANSA, J. M.—El régimen de brisas de la isla de Mallorca (Rev. de Geofísica, Madrid, 1946, V, julio-sept.).
- JANSA, J. M.—Un frente tormentoso notable (Rev. Geofísica, Madrid, 1946, V, enero-marzo). Se refiere al temporal del 24-25 nov. 1942.

---

*Terminada la lectura de la anterior comunicación, son aprobadas sus conclusiones, y se concede la palabra a D. Felipe Lafita, que hace una exposición extensa y documentada del trabajo que se publica a continuación: N.º 137.*



## N.º 137. - Aprovechamiento de la energía eólica

Autor: D. FELIPE LAFITA BABIO

Ingeniero Aeronáutico

Colaboradores: D. DANIEL OLIVER OSUNA, D. JUAN DE LA CIERVA MALO DE MOLINA  
y D. PEDRO BLANCO PEDRAZA

Ingenieros Aeronáuticos

### HISTORIA Y ENSAYOS REALIZADOS

Probablemente, una de las fuentes de energía primeramente utilizadas por el hombre ha sido la debida a las fuerzas eólicas, sin duda a causa de su sencilla comprobación, ya que sus efectos son perfectamente perceptibles a la vista. Son de sobra conocidas las aplicaciones que desde tiempos remotísimos se han hecho de la energía eólica; así, las primeras naves fueron impulsadas por el viento y, gracias a ellas, se consiguieron los grandes descubrimientos de América, etc. Igualmente, los primeros molinos harineros y sistemas de irrigación para elevar agua del subsuelo debieron, sin duda, realizarse aprovechando esa misma energía. En Holanda y en España, principalmente en La Mancha, Baleares y Canarias, existen aún muestras de ellos. Ahora bien, hasta hace muy pocos años, estos molinos eran de construcción absolutamente empírica; por lo que su rendimiento fué muy pequeño. Hoy día, gracias a los progresos científicos y experimentales de la aerodinámica, se han llegado a fabricar no solamente molinos o turbinas

aéreas que utilizan con gran aprovechamiento la energía del viento (rendimiento alrededor de 20 %), sino también a suprimir el inconveniente principal que, desde el punto de vista estructural, existía en las primitivas instalaciones, a causa de los enormes esfuerzos que se producían cuando el viento alcanzaba grandes velocidades. Esto se ha evitado mediante el empleo de aeromotores con palas de paso reglable, automático, lo que, sin duda, se ha conseguido como consecuencia del empleo en los aviones de este tipo de propulsor.

Por otra parte, el estudio del mapa aerológico de los distintos países, con los métodos de que en la actualidad se dispone, ha permitido un mayor conocimiento para la ubicación de las instalaciones experimentales.

Todo ello ha dado como resultado «que el problema del aprovechamiento de la energía eólica haya dejado su fase inicial de empirismo para entrar de lleno en la fase científica», con lo que, no cabe duda, se logrará reducir la constante angustia que en la ac-



tualidad sienten muchos países, al ver muy mermadas sus disponibilidades hidráulicas y el enorme consumo de combustible necesario para compensar ese déficit mediante energía térmica. Pues bien, todas estas circunstancias han dado lugar a que nuevamente adquieran actualidad los aeromotores, y en todos los países industriales o con agricultura mecanizada, no solamente se dispone de abundantísimas instalaciones de pequeña potencia, como más tarde veremos, sino que, en algunos de ellos, se realizan actualmente proyectos e instalaciones de gran potencia que, si son acompañadas por el buen éxito, indicarán, sin duda alguna, la necesidad de que nuestro país no se encuentre al margen de tales investigaciones y experimentos.

Las primeras instalaciones modernas, realizadas con carácter privado, están constituidas por un molinete aéreo, una dinamo y una batería de acumuladores, para asegurar la continua distribución de energía eléctrica, aun en los períodos de calma o de muy pequeñas velocidades de viento. Estas instalaciones, a pesar de su pequeña potencia, llenan una gran necesidad, principalmente, en los campos no cruzados por líneas eléctricas, y han adquirido gran importancia. Así, por ejemplo, en Holanda, en la región de Flandes, se encuentran, aproximadamente, 10 aeromotores de 10 Kw. por Km<sup>2</sup>. En Francia y en el Marruecos Francés existen igualmente muchas instalaciones de las Compañías Electromecánica y ENAG. En Estados Unidos, la Sociedad Wind-Charger ha suministrado más de 500.000 instalaciones de este tipo. También en Rusia la Casa Petrowski, de Cherson, ha fabricado con fines agrícolas muchas instalaciones de potencia aproximada a 12 Kw. con palas de 12 ms. de diámetro. Solamente en el año 1943 estaba previsto en este país que se fabricasen 29.000 instalaciones de diversos tipos, con una potencia total instalada de 120.000 Kw., que suponían suministrarían anualmente, con una velocidad de viento de 5 m/s., una energía de  $312 \times 10^6$  Kw/hora. Puede considerarse, igualmente, que, con potencias que podemos denominar medias, entre 20 y 50 Kw., se han logrado, igualmente, excelentes éxitos en muchos países.

Probablemente es Dinamarca el país que en la actualidad posee mayor número de centrales aéreas.

La evolución del número de instalaciones en este país es la siguiente:

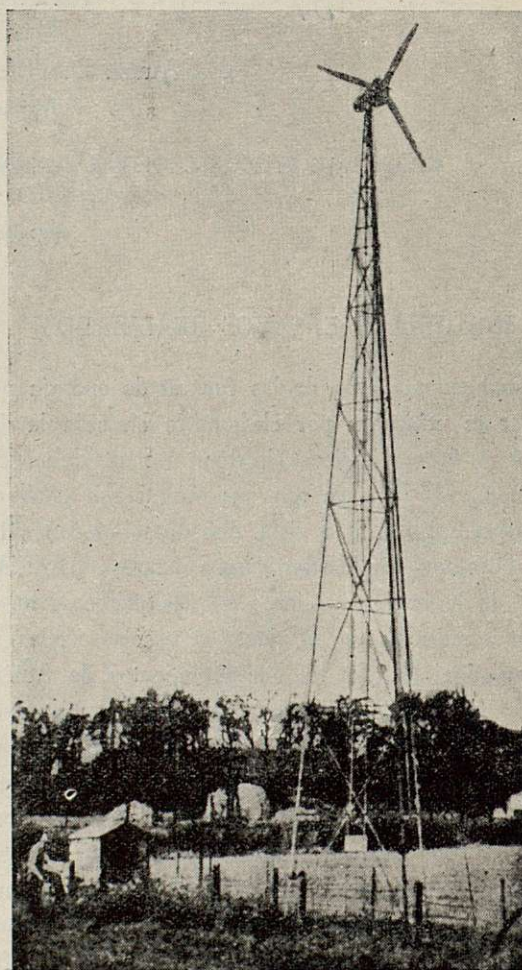
Año	Núm. de instalaciones
1940	16
1944	88
1947	57

La disminución observada en el año 1947 ha sido debida a la terminación de la guerra mundial.

Durante siete años se han producido 18.055.000 Kw/h.

El año de mejor producción fué el de 1943, en el que llegó a 3.223.000 Kw/h.

Durante el año 1947, con un generador de 70 Kw., trabajando únicamente de noche, se obtuvieron 119.000 Kw/h.

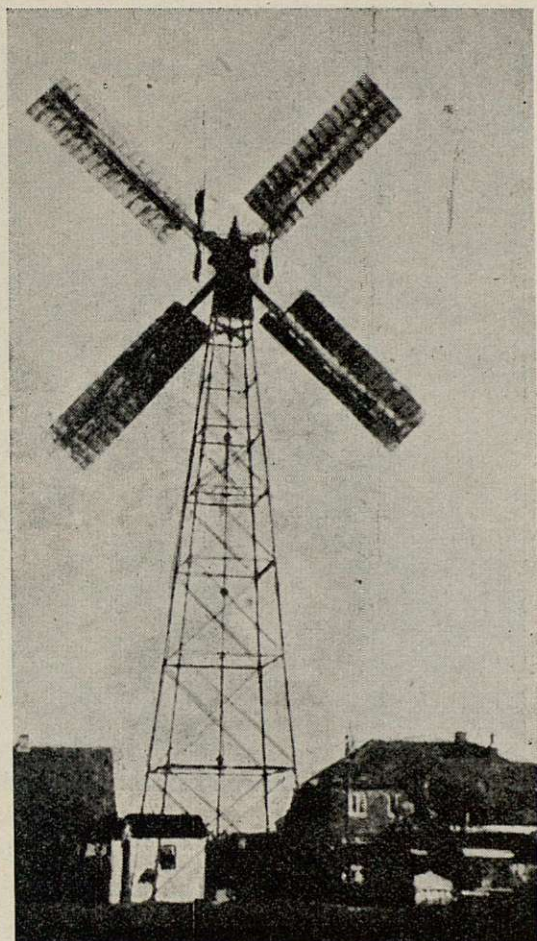


Generador "Windpower" de 1.800 vatios, 32 voltios, instalado en una torre de 55 pies.

Fig. 1



En las figuras 1-2-3 y 4 se indican algunos de los tipos más empleados en dicho país. Las firmas más acreditadas en este tipo de instalaciones son la Mam-



Generador "Lykkegaard", de 30 kilovatios, con las aspas dispuestas para girar ("flaps" cerrados).

Fig. 2

mouth y la Smidth. La figura 4 corresponde a una instalación de 70 Kw., fabricada por la última.

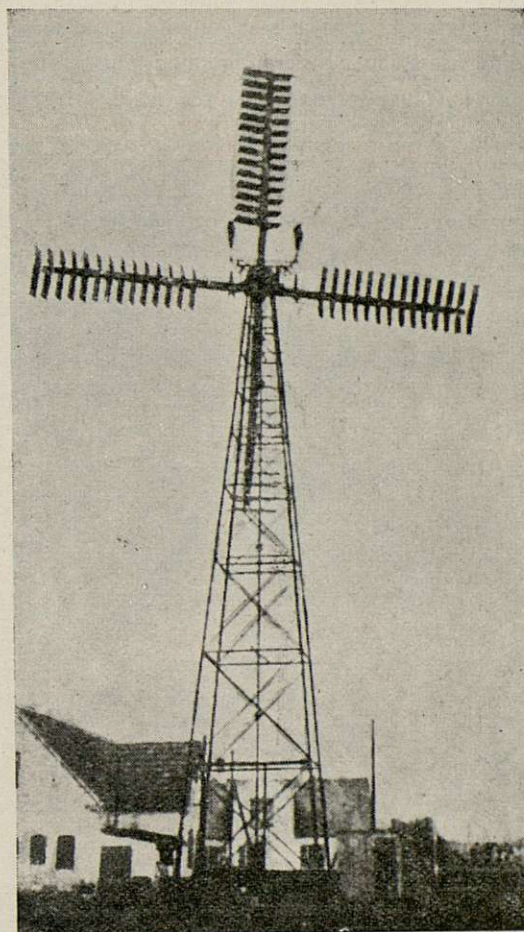
En general, estas instalaciones alimentan redes de corriente continua de poca extensión, de las denominadas redes comunales.

En el África del Norte, la firma Electro-Mecánica ha construido también instalaciones con molinetes de 30 ms. de diámetro y potencia de 50 Kw.

En Rusia, en la región de Balaklava, se instaló una central aérea de 100 Kw. sin buen éxito, por lo que quedó en suspenso el proyecto de la gran instalación de 10.000 Kw. que debía instalarse en Ai-Petri, en Cri-

mea. Según la revista «Electrichestvo», la instalación mecánica no ofreció las condiciones de seguridad exigida para las grandes velocidades de viento.

En Inglaterra se presta en la actualidad gran atención al problema. Ha encargado la North of Scotland Hydro Electric Board a la firma John Brown and Co. el pasado mes de agosto, la fabricación de una instalación experimental de 100 Kw. y regulación automática. La elección de esta potencia muestra un aumento razonable sobre las existentes normalmente hasta nuestros días, y no dará lugar a grandes gastos. El lugar donde se instalará el molino será probablemente en Costa Hill, donde existen grandes vientos.



Generador "Lykkegaard", de 30 kilovatios, parado ("flaps" abiertos).

Fig. 3

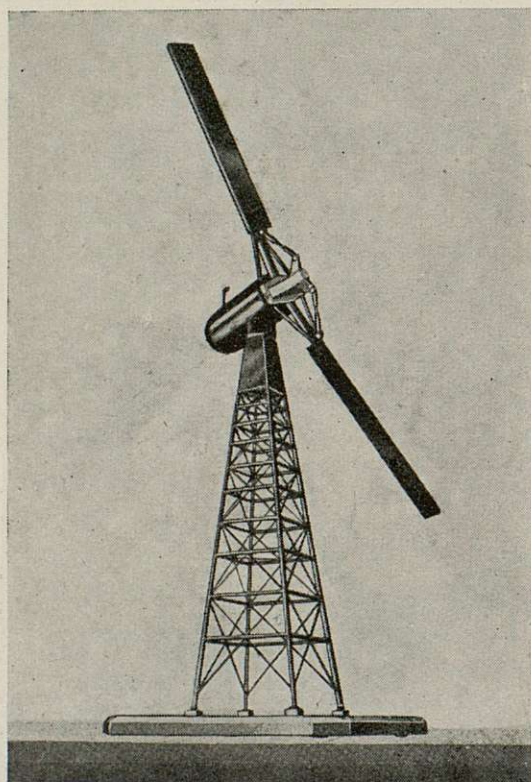
En Francia han sido recientemente establecidos por la «Electricité de France» unas 100 estaciones para la determinación de la energía del viento y, además, esta



misma casa ha subvencionado varios proyectos para potencias elevadas alrededor de los 1.000 Kw.

Hace unos años (1941) se han hecho en EE. UU. los primeros experimentos con una instalación de unos 1.250 Kw. (fig. 5) situada en Rutland (Vermont), en cuyo proyecto intervinieron destacadas personalidades de las finanzas (Sociedad Morgan Smith) y de la ciencia. La parte aerodinámica fué estudiada por el eminente Profesor Von Karman, tan querido en el ambiente aeronáutico español. El molinete de esta instalación era de dos palas con un diámetro de 53 ms., que movía, por intermedio de un tren de engranajes, un alternador de 1.250 Kw. a 600 r. p. m. La regulación del paso de las palas era automático, mediante un servo-motor, con el que se mantenía la velocidad de rotación constante. El alternador estaba unido, mediante un transformador, a la red de distribución de

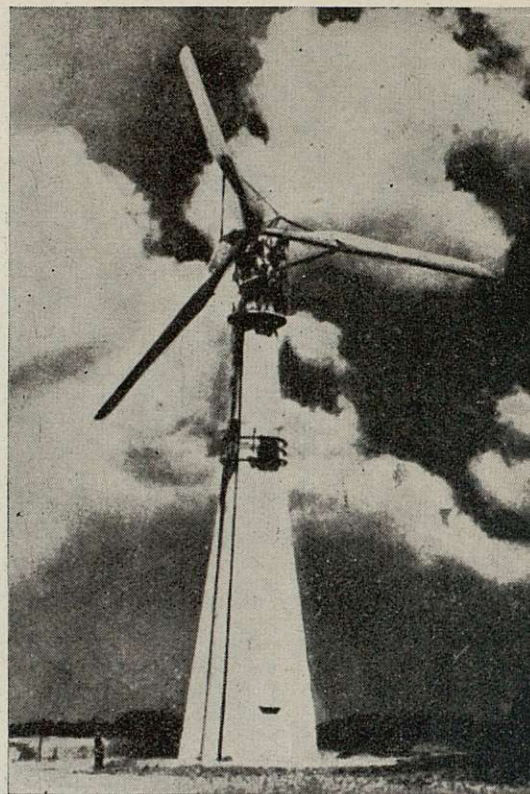
en una de las palas. Una vez reparada esta avería, estuvo funcionando durante los días 3 al 26 de marzo, produciendo durante este espacio de tiempo 61.780



Generador de 70 kilovatios, accionado por viento.  
(F. L. Smidth & C.º Ltd., Copenhague.)

Fig. 4

44.000 v. de la Central Vermont, Public, Service Corporation. Esta instalación produjo 298.240 Kw/h. hasta que fué desmontada, a causa de averías producidas



Modelo a escala para la fabricación de la turbina de aire  
"Smit-Putnam".

Fig. 5

Kw/h. a pesar de haber sido un período excepcional de calma.

El día 23 de marzo, funcionando la instalación bajo un viento moderado de 9 m/s., sobrevino la rotura de una de las palas, producida por corrosión en la proximidad del núcleo.

Como consecuencia de esta avería, se han abandonado por el momento estos experimentos, ya que la Central Vermont Public Service Corporation ofreció pagar 130 \$ por Kw, instalado para un grupo de 10.000 Kw. que debía situarse en las montañas de Vermont a 1.200 ms. de altura, y la empresa constructora exigía 190 \$ por Kw.

Parece, por lo tanto, que la principal razón por la cual no han continuado los experimentos es de orden económico, y cabe ahora preguntarse: ¿nunca podrá aprovecharse con buen éxito la energía del viento? En-



tiendo que puede contestarse, de manera categórica, que llegará el día en que, sin duda alguna, podrá emplearse esta fuente de energía, primeramente porque el fracaso de orden técnico producido era de esperar, ya que el salto en potencia dado por los americanos fué enorme (de unos 50 a 1.250 Kw.), y ya sabemos que, generalmente, los progresos de ingeniería suelen realizarse paso a paso, y el dado por los técnicos de aquel país quizás ha sido demasiado audaz. Ahora bien, probablemente de la mencionada instalación se habrán obtenido consecuencias valiosísimas para futuros proyectos. Así, por ejemplo, de acuerdo con los resultados obtenidos, el Ingeniero americano Percy H. Tomas, de la Comisión Federal de Energía de Washington, ha realizado el estudio completo de dos instalaciones de 6.500 y 7.500 Kw. mediante dos molinetes gemelos, los cuales se ligan a una generatriz común de corriente continua. La energía se enviará a la red, mediante una conmutatriz. Calcula el mencionado Ingeniero para precio de la instalación, alrededor de 70 \$ Kw., siempre que se construyan 10 unidades.

En el problema económico, no cabe duda que influirá enormemente el país donde quieran hacerse las instalaciones, ya que, si las disponibilidades hidráulicas y térmicas no son muy grandes, puede no ser gran inconveniente el mayor precio que para primera instalación puedan tener este tipo de centrales, ya que siempre será más económico disponer, en determinados momentos, de energía, aunque sea más cara, que no disponer en absoluto de ella.

Quizá personas no muy ligadas a la técnica aeronáutica, puedan ser escépticas en este problema, al preguntarse: si esta fuente de energía ha sido conocida por el hombre desde el comienzo de su existencia, ¿cómo es posible que hasta nuestros días no se haya tratado de aprovecharla de manera más general a como se ha hecho? La respuesta, creo que es sencilla. Sin meternos en las grandes divagaciones de los geólogos e hidráulicos, en las que parece no se encuentran muy de acuerdo sobre la fecha en la que el mundo habrá concluido con todas sus reservas térmicas de petróleo y de carbón, e hidráulicas, lo que sí puede afirmarse es que, en un plazo que, desde luego, no representa nada en la vida del mundo, desgraciadamente eso ocurrirá, y, por lo tanto, habrá que recurrir a nuevas fuentes de energía, y, si la eólica no ha sido ya aprovechada en la proporción debida, no cabe duda de que

la razón principal es que ella está íntimamente ligada a la ciencia aerodinámica, y es precisamente durante este siglo, y más aún dentro de los diez últimos años, cuando aquélla ha realizado progresos sorprendentes que han de dejarse sentir extraordinariamente en el problema que tratamos.

Una de las mayores críticas sobre el aprovechamiento de la energía eólica es su falta de regularidad, pero, si hemos de ser sinceros, tenemos que reconocer que, en más o menos grado, casi todas las formas de energía pecan de ese mismo defecto, de tal modo que la hidráulica, por ejemplo, necesita de embalses para tratar de corregirla en parte. Evidentemente, con el viento no podemos hacer lo mismo y, únicamente, para pequeñas potencias hemos visto que, desde el punto de vista eléctrico, puede lograrse esa regularidad mediante baterías de acumuladores, con todos los inconvenientes a ellas inherentes. Ahora bien, no cabe duda de que existen muchos problemas, para los cuales no es necesario disponer de potencia continua. Así, por ejemplo, para el riego puede disponerse de albercas o depósitos elevados, que se llenan durante las horas de viento. Lo mismo sucede para secado de maderas, deshidratación de leguminosas, destilaciones, obtención de hielo, etc.

Por todo ello, no parece pueda considerarse como obstáculo irrebalsable la no continuidad de la disponibilidad de energía eólica.

## ESTUDIO AERODINÁMICO

No vamos a exponer aquí, con toda su amplitud, la teoría aerodinámica de un molino de viento de palas, que fué establecida por el Profesor de la Universidad de Goetingen, en 1927, A. Betz. Nos limitamos a un conciso recordatorio de sus puntos más esenciales.

Comenzaremos por indicar la diferencia esencial entre una hélice y un molinete o molino.

La hélice comunica energía a la corriente de aire, incrementando su velocidad; el molinete absorbe energía de la corriente de aire, reduciendo aquélla.

Por esta razón, así como la corriente a través del disco de una hélice es compresiva, es decir, que el diámetro de la estela es menor que el de la hélice, en el molinete o molino es expansiva, por lo que el diámetro de la estela es superior al del molinete.

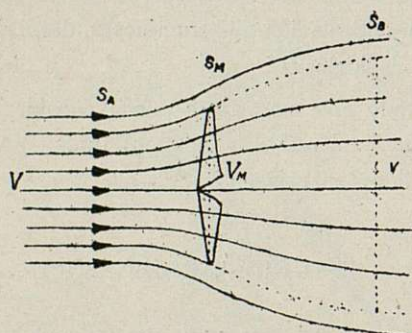


Evidentemente, un estudio teórico a fondo debe ser necesario para fijar la solución más adecuada, con el fin de obtener el máximo rendimiento aerodinámico. Ahora bien, como más tarde veremos, el problema económico está fuertemente afectado por la solución aerodinámica adoptada para las palas. Se ha comprobado que ligera mejora en el rendimiento aerodinámico lleva consigo gran aumento en el coste inicial de la instalación. Esta es la razón principal, por la que no vamos a dedicar espacio excesivo al estudio considerado.

Podemos aplicar, en el caso considerado, todas las teorías conocidas sobre propulsores; la de variación de la cantidad de movimiento, la circulatoria, etc.

Para exposición de la primera, la cual es aplicable a cualquier tipo de máquina transformadora, y que nos da rápidamente de manera aproximada la energía que se puede obtener del viento, se considera el molinete como un obstáculo que reduce la velocidad  $V$  con que llega el viento a él, a una velocidad  $v$  detrás de él.

Por lo tanto, si consideramos dos secciones  $S_A$  y  $S_B$ ,



Líneas de corriente en la vena que pasa por un molinete.  
Fig. 6

(figura 6), en las cuales las velocidades son  $V$  y  $v$ , la variación de cantidad de movimientos será:

$$M \Delta V = \rho (S_A V^2 - S_B v^2) \quad (1)$$

Esta expresión nos dará, por lo tanto, la reacción del molinete sobre el viento y, como ella, se traslada con velocidad  $v$ , la energía teórica absorbida del viento, por el molinete, en la unidad de tiempo será:

$$E = M \Delta V V_M = \rho (S_A V^2 - S_B v^2) V_M \quad (2)$$

$V_M$  = velocidad del viento en el plano del molinete.  
La condición de continuidad nos da:

$$S_A V = S_B v = S_M V_M \quad (3)$$

( $S_M$  = sección barrida por el molinete) y la expresión (2) tomará la forma:

$$E = \rho (S_M V_M V - S_M V_M v) V_M = \rho (V - v) S_M V_M^2 \quad (4)$$

y como

$$V_M = \frac{V + v}{2}$$

$$E = \rho \frac{V^2 - v^2}{2} V_M S_M = \frac{\rho}{4} S_M (V + v) (V^2 - v^2) \quad (5)$$

El máximo teórico de energía absorbida corresponderá al máximo de esta expresión (5).

Si hacemos  $\frac{v}{V} = K$ . La expresión anterior toma la forma

$$E = \frac{\rho}{4} S_M V^3 (1 + K) (1 - K) \quad (6)$$

Esta expresión se hace máxima para  $K = 1/3$  y su valor será

$$E_{\text{máx}} = \frac{8}{27} \rho S_M V^3 = 0,297 \rho S_M V^3 \quad (7)$$

La energía contenida en el aire, que atraviesa el círculo barrido por el molinete es  $\frac{1}{2} \rho S_M V^3$ , luego la máxima energía total de viento, que puede aprovecharse, es los  $\frac{16}{27}$  de la que pasa a través del molinete.

Al nivel del mar,

$$\rho = \frac{1,25}{9,81} = 0,1225 \text{ „}$$

luego

$$E_{\text{máx}} = 0,0370 S_M V^3 = 0,116 R_M^2 V^3 (\text{Kgs. ms.}) = 0,00155 R_M^2 V^3 (\text{C.V.}) \quad (8)$$

Para otra altura cualquiera, será suficiente multiplicar esta expresión por la relación de densidades.

Como el régimen del viento es siempre subsónico, para cada altura se puede considerar a  $\rho$  constante.

Para la captación de esa energía se han empleado diversos tipos de máquinas transformadoras, tales como: a) pananemonos, en los cuales las superficies



móviles están dispuestas perpendicularmente a la dirección del viento, y se desplazan en el sentido de aquel, y cuyo rendimiento es muy pequeño, por lo que hoy día están desechados; b), turbinas, en las que las superficies no son perpendiculares al viento, sino que forman ligero ángulo con él; c), rotores Fletner; d), molinetes con palas de hélice.

En la actualidad las únicas que parece han de ser desarrolladas son estas últimas, y, por ello, solamente a ellas nos vamos a referir.

Cualquiera de las expresiones anteriores nos dan, como hemos indicado, la potencia máxima teórica que puede obtenerse del viento. En la práctica habrá que multiplicar dichas expresiones por un factor  $\zeta$  que representará el rendimiento de la máquina considerada. Por lo tanto, la energía realmente aprovechable será:

$$E_{m\acute{a}x} = \frac{8}{27} \zeta \rho S M V^3$$

En el caso de molinetes con palas de hélice  $\zeta$ , es función únicamente de  $\Omega R/V$ , siendo  $\Omega$  la velocidad angular del molinete. En la fig. 103, pág. 332, Durand, tomo IV, tenemos trazado gráficamente  $\zeta = \varphi(\Omega R/V)$ , y de ella se desprende que el valor máximo

de  $\zeta = \eta$  es 0,297. Este valor, como ya hemos indicado,

es el máximo teórico, ya que no se tiene en cuenta las pérdidas por fricción en las palas. Por esta

razón no debe tomarse para  $\eta = \frac{8}{27} \zeta$  un valor superior a 0,20.

Como hemos indicado a su tiempo, en la actualidad los molinetes que se emplean en la práctica son de paso variable automático, para obtener una velocidad de rotación constante. Por ello vamos a indicar a continuación cuál es el funcionamiento de un molinete de este tipo.

Para una cierta velocidad de viento  $V_a$ , denominada velocidad de arranque, la potencia disponible es suficiente para hacer arrancar el molino y compensar los rozamientos debidos a cojinetes, generador en vacío, etcétera; a partir de  $V_a$  la potencia que da el molino es prácticamente proporcional a  $V^3$  (ya que el rendimiento para  $\Omega R/V$  grande es casi constante e igual al máximo). Este estado continúa hasta un valor de la ve-

locidad del viento  $V_p$ , denominada de proyecto, para el cual la potencia del molino es igual a la nominal. Por encima de ésta, la potencia se mantiene constante, es decir, se desperdicia la energía sobrante del viento, a cambio de mejorar la regularidad en el suministro de energía. Para vientos muy fuertes el molino pudiera estar expuesto a averías, y por ello, a partir de un valor  $V_D$  denominado «velocidad de desconexión», las palas se ponen en bandera, con lo que baja a cero la potencia desarrollada.

Desde el punto de vista aerodinámico, las palas de mejor rendimiento serían aquellas en que el coeficiente de sustentación fuese constante desde la raíz a la punta. Esto sólo se puede lograr haciendo la cuerda y el paso variables a lo largo de ella. Por otro lado, las necesidades estructurales imponen limitaciones, de tal forma que es prácticamente imposible conseguir una pala que dé el 100 % de la potencia ideal. T. Von Karman hizo un estudio, en relación con los experimentos americanos, para determinar la mejor forma de pala. Analizó hasta 16 combinaciones de forma y de paso: palas rectangulares no alabeadas, trapeciales, y de coeficiente de sustentación constante. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- 1.—La mejor pala (cuerda y paso variables) proporcionaba una potencia 95 % de la ideal.
- 2.—La mejor pala trapecial daba el 92 %.
- 3.—La mejor pala rectangular no alabeada daba el 98 % de la alabeada.

Por otro lado, el precio de la mejor pala es, según cálculos americanos, aproximadamente doble que el de la rectangular.

Se ve, por ello que, al menos, para instalaciones grandes, en las que el precio de las palas representa una importante fracción del coste total, la mejora del rendimiento por consideraciones aerodinámicas, está contrapesada por el mayor costo de instalación, y la solución más práctica, es la más sencilla, de palas rectangulares no alabeadas.

Por la misma razón, la mejora que pueda conseguirse por el empleo de un perfil de alto rendimiento es pequeña, y por ello el criterio para la elección del perfil es el estructural.

En cuanto al número de palas, también el coste es un factor importante en su elección; además, para una superficie de palas dada, cuanto menor sea el número de ellas, mayor será su cuerda, y, por tanto, su



espesor, lo que facilita su construcción desde el punto de vista estructural.

Sin embargo, la solución de dos palas, que parece ser la mejor, tiene inconvenientes por la mayor importancia de las vibraciones, que se inducen en el rotor, cuando el viento no es completamente axil, o su distribución en altura no es uniforme. En efecto, si  $v$  es la componente del viento en el plano del disco, la velocidad resultante en un punto a la distancia  $r$  del eje para una posición  $\varphi$  de pala es

$$V = \Omega r + v \sin \varphi$$

Tanto el par como la tracción son proporcionales a  $v^2$ , o sea de la forma

$$\left. \begin{matrix} T \\ Q \end{matrix} \right\} = A + B \sin \varphi + C \cos 2 \varphi$$

y al sumar, sobre todas, las palas, el término de frecuencia doble que la del molino, no se anula si el número de palas es dos, pero desaparece para tres, etcétera. Se ve, por ello, que para  $N = 2$ , tanto el par como la tracción de las palas, son pulsatorias, lo cual es el origen de las vibraciones. Es posible que tal vibración fuese una de las causas que motivaron la rotura de una pala en el molino experimental americano.

Por ello, parece aconsejable no disminuir el número de palas por debajo de tres, aun a costa del aumento de precio que ello representa.

## ESTUDIO GENERAL DE LOS VIENTOS EN ESPAÑA

Lógicamente, si hemos de emplear el viento como fuente de energía, lo primero que necesitamos es hacer un estudio concienzudo de él, así como de su distribución en nuestro país.

La densidad del aire, así como su velocidad media en los distintos lugares, es normalmente muy inferior a la de otros flúidos empleados como propulsores, tales como el agua, el vapor, etc., y, por lo tanto, su energía cinética será muy inferior a la de aquéllos, lo que trae unido el que, para obtener la misma potencia, necesitemos un área proyectada de palas en los molinetes aéreos, muy superior a la de las turbinas hidráulicas o de vapor. Esto es un inconveniente para las instalaciones que estudiamos, ya que, por el gran tamaño de las palas, se necesitan grandes soportes,

fuertemente cimentados, es decir, mucho peso muerto que, naturalmente, encarece los gastos de primera instalación. Instalaciones de unos 1.000 Kw. pesan, aproximadamente, unas 250 tns.

Como hemos visto en los estudios anteriores, la potencia que puede obtenerse del viento es sensiblemente proporcional al cubo de la velocidad; por ello, todas las demás cosas iguales, un molinete instalado en un lugar con viento de 20 kms/hora, nos da una potencia ocho veces mayor, que instalado donde la velocidad es únicamente de 10 kms/hora. Por esto se comprende la importancia capital que tiene en este problema la fijación más adecuada del lugar de la instalación.

Los únicos datos que en la actualidad poseemos para este fin, son los dados en los Boletines Meteorológicos mensuales y en el folleto anual titulado «Climatología de España», publicado por la Dirección General de Protección de Vuelo, y con ellos hemos realizado el mapa de vientos de España que se adjunta. Pero podemos decir que, para el problema estudiado, estos datos no llenan todas nuestras necesidades y que sirven únicamente para darnos ligera idea de los lugares que nos conviene explorar más a fondo, pero sin que ello quiera decir que no existan otros lugares, que puedan ser tan buenos o mejores para la resolución del problema planteado. Las razones son bien sencillas; los datos que figuran en las citadas publicaciones son obtenidos de observatorios situados en aeródromos o núcleos de población donde, como norma general, no se suelen producir grandes vientos, y con anemómetros situados de 10 a 15 ms. de altura. Como las instalaciones, en general, tienen alturas superiores a éstas, y la velocidad del viento aumenta con ellas, es preciso recurrir a datos experimentales para obtener valores exactos aplicables en la elaboración de los proyectos. Por otra parte, la configuración local del terreno tiene igualmente importancia capital en la distribución de los vientos. Puede obtenerse una aproximación de esta distribución, mediante pruebas en el túnel aerodinámico, sobre planos en relieve del terreno, aunque la mejor solución es hacer comprobaciones en el mismo terreno. Conviene tener presente que, con una elección apropiada para la ubicación de una instalación, puede lograrse un aumento de un 60 % sobre la velocidad del viento normal en la zona que rodee aquélla; por ello, nunca será malgastado todo



el presupuesto que se dedique a determinar la mejor situación de las instalaciones. Para este fin es muy conveniente consultar con las personas que viven largo tiempo en los lugares explorados, así como comprobar cómo se comporta la vegetación, etc.; por ejemplo, si existen coníferas, y se ve que ellas están inclinadas, es señal inequívoca de que existen vientos constantes en la dirección de su inclinación. Teóricamente puede obtenerse una idea del comportamiento del viento a distintas alturas y al encontrarse con determinados obstáculos.

La velocidad del viento aumenta con la altura, lo cual es completamente lógico, ya que, aunque el terreno sea excepcionalmente plano y libre de obstáculos, tal como en el Gran Desierto Australiano, siempre la fricción con el suelo reduce aquélla, de tal modo, que en las capas próximas al suelo, la velocidad es, generalmente, menor que la que corresponde al viento del gradiente.

Se entiende por «viento del gradiente», el viento ideal que se obtiene, suponiendo que se desprecia la mezcla turbulenta, que se origina normalmente en el aire a causa de las variaciones de temperatura, y los obstáculos.

En terrenos abruptos, especialmente en verano, es muy difícil determinar a qué altura se obtiene el viento del gradiente, a causa de la gran variación de la temperatura con la altura.

En terrenos llanos se toma para altura del viento del gradiente 1.000 ms.

Examinemos ahora algunos casos sencillos de obstáculos.

### 1.º Colina de forma hemisférica.

En este caso, las líneas de corriente se acumulan en la cumbre y se reduce la turbulencia. Teóricamente se comprueba que en el caso ideal, si la velocidad del viento en el llano es  $V$ , en la cumbre se con-

vierte en  $\frac{3}{2} V$ . El factor de aumento de potencia

$$p = \left(\frac{3}{2}\right)^3$$

### 2.º Colina de forma cilíndrica.

En este caso, la velocidad en la cumbre, en el su-

puesto de que la dirección del viento sea perpendicular al eje del cilindro, adquiere un valor doble de la del llano. El factor de aumento de potencia será:  $p = 2^3 = 8$ . Si el viento incide con un ángulo  $\theta$  respecto al eje, la velocidad máxima en la cumbre tiene por valor

$$V_c^2 = 4 V^2 \sin^2 \theta + V^2 \cos^2 \theta$$

Por lo tanto, el factor de aumento de velocidad será

$$a^2 = 4 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 + 3 \sin^2 \theta$$

con lo que el factor de aumento de potencia será

$$p = a^3 = (1 + 3 \sin^2 \theta)^{3/2}$$

Si se supone que existe la misma probabilidad para todas las direcciones, se obtiene el valor medio de  $p$ , mediante la integración de

$$\bar{p} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 + 3 \sin^2 \theta)^{3/2} d\theta.$$

estos dos da  $p = 4,22$ .

Las colinas de forma de perfil de ala son muy adecuadas para el problema estudiado, ya que la velocidad sobre el trasdós es bastante superior a la velocidad de régimen.

En cambio, los terrenos muy abruptos son poco adecuados a causa del régimen turbulento, que se origina a sotavento de los grandes picos.

Los datos que nos han servido para la confección del mapa son los correspondientes a cinco años.

El examen del mencionado mapa comprueba que existen, desde luego, algunas regiones realmente interesantes. Estas son: Galicia (Zona de La Coruña), Santander (Cabo Mayor), Vizcaya (Serantes), Cataluña (Montseny, y Bagur), Andalucía (zona del Estrecho, San Fernando), Norte de África, Sáhara español (Villa Cisneros) y Canarias.

Desde luego, las Islas Canarias y el Sáhara Español presentan condiciones inmejorables, ya que invierno y verano están barridos por los alisios del N.-NE., y con mayor intensidad durante los meses de estío.

Probablemente, dada la configuración de nuestro suelo con sistemas montañosos casi paralelos, deben existir otros muchos lugares apropiados para la resolución del problema estudiado. Sin duda, la Sierra del Guadarrama debe reunir buenas condiciones.

De lo indicado anteriormente se desprende que exis-



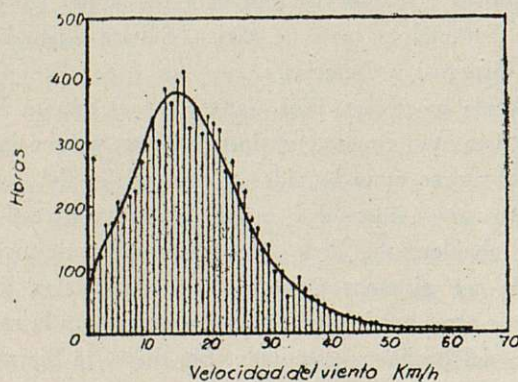
ten buenas posibilidades en las proximidades de grandes núcleos de población y de instalaciones industriales importantes, lo que representa gran ventaja para este tipo de instalaciones.

## ENERGÍA DEL VIENTO

Acabamos de ver que, tanto la energía disponible del viento, como la aprovechable, son proporcionales al cubo de su velocidad; por lo tanto, para determinar la energía que podemos obtener en un lugar determinado, será preciso fijar durante qué número de horas por año la velocidad del viento en dicho lugar está comprendida entre las fijadas como de proyecto, y de desconexión.

Por esta razón, la velocidad media aritmética, dato muy empleado por antiguos constructores para elaborar sus proyectos de molinos, no tiene en la actualidad gran valor. La realmente interesante es la velocidad media energética, media del cubo de las velocidades, que, naturalmente, no es igual al cubo de la media aritmética. Por esta misma razón es por lo que los datos que se obtienen de las publicaciones de los Servicios Meteorológicos Nacionales no llenan por completo las exigencias de nuestro problema, ya que, como norma general, las velocidades de viento suministradas corresponden a márgenes excesivamente grandes. Es preciso tomar los datos de los mismos anemómetros que nos dan: la velocidad media durante cada hora, con una aproximación de 1 Km/hora.

Mediante estos datos podemos obtener la curva denominada de «frecuencia-velocidad», cuya forma general es la indicada en la fig. 7, que tiene por abscisas velocidades de viento, y por ordenadas, tiempos

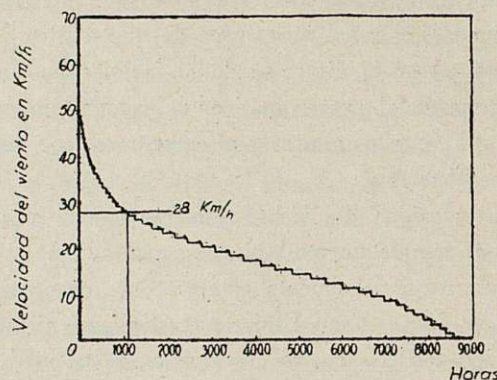


Curva de velocidad frecuencia.

Fig. 7

o tantos por ciento del tiempo que se tome como unidad, que, generalmente, es el año.

De esta curva puede obtenerse, mediante integraciones, la de la fig. 8, que es la que realmente nos interesa, la cual se denomina de «duración de la velocidad».



Trazado de la curva de duración de velocidad.

Fig. 8

En ella se ha tomado como unidad de tiempo el año, 8.760 horas, siendo sus abscisas tiempos, y sus ordenadas velocidades. El significado de esta curva es el siguiente: si por la abscisa 1.100 trazamos una ordenada, ésta corta a la curva en un punto correspondiente a 28 Kms/h., lo que quiere decir: que la velocidad del viento ha sido igual o superior a este valor, durante 1.100 horas del año.

Evidentemente, durante las 8.760 horas del año la velocidad fué igual a cero, o pasó de este valor.

La velocidad media en el año puede obtenerse rápidamente de esta curva, ya que

$$\bar{V} = \frac{1}{8.760} \int_0^{8.760} V dt = \frac{\text{Área entre la curva y los ejes}}{8.760}$$

Teniendo en cuenta que

$$E = K S V^3$$

siendo: K = constante, S = superficie barrida por el molinete, V = velocidad instantánea; a cada curva de duración de velocidad corresponderá otra de duración de potencia, que se obtendrá elevando al cubo las ordenadas de aquélla. La fig. 9 muestra la forma general de una curva de este género correspondiente a un lugar bien elegido. En dicha figura están consideradas las tres velocidades,  $V_a = 17$  kms/hora, velocidad de

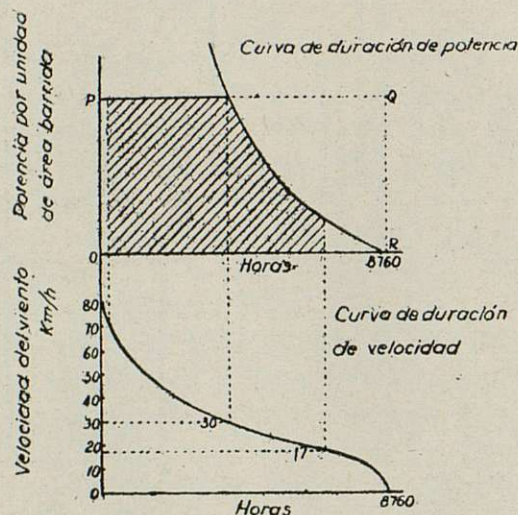






arranque;  $V_p = 30$  kms/hora, velocidad de proyecto y  $V_D = 70$  kms/hora, velocidad de desconexión.

Si la velocidad del viento fuese siempre constante e igual a  $V_p$ , la energía potencial del viento sería proporcional al área del rectángulo OPQK; en cambio,



Curvas de duración de velocidad y potencia del viento.

Fig. 9

a causa de la intermitencia del viento, el número de Kw-h. producidos en el año por unidad de superficie barrida por el molinete, será

$$\text{Kw-h.} = \frac{1}{S} \int_0^{8760} E \, dt$$

La relación de las dos áreas nos dará la fracción de potencia obtenida. Del examen de dicha figura, dada la forma de la curva de duración de potencia, se observa que, cuanto menor sea la velocidad de proyecto  $V_p$ , mayor será la fracción de potencia obtenida. Sin embargo, para producir la misma potencia instantánea, sería preciso aumentar el diámetro de las palas del molinete, en la relación

$$\frac{D_n^2}{D_a^2} = \left( \frac{V_{pa}}{V_{pn}} \right)^3$$

$D_n$  = diámetro nuevo

$D_a$  = » antiguo

$V_{pa}$  = velocidad antigua

$V_{pn}$  = » nueva

Hemos determinado la velocidad media, de acuer-

do con la curva de duración de velocidades, mediante la expresión

$$\bar{V} = \frac{1}{8760} \int_0^{8760} V \, dt$$

Si durante todo el año el viento actuase con la velocidad media  $\bar{V}$ , su energía potencial sería

$$E_p = \int_0^{8760} K \bar{V}^3 \, dt = 8760 K \bar{V}^3$$

Sin embargo, de la curva de duración de potencia, se saca la energía obtenida, mediante la expresión

$$E_o = \int_0^{8760} E \, dt = \int_0^{8760} K V^3 \, dt$$

a la relación  $E_o/E_p$  se la denomina factor de distribución de potencia, cuyo valor será, por lo tanto,

$$e = \frac{E_o}{E_p} = \frac{\int_0^{8760} K V^3 \, dt}{8760 K \bar{V}^3} = \frac{1/8760 \int_0^{8760} K V^3 \, dt}{K \bar{V}^3} = \frac{(\bar{V}^3)}{\bar{V}^3}$$

ya que el numerador representa la velocidad media energética, es decir, la velocidad que permaneciendo constante durante el año, produciría la misma potencia que la obtenida en la realidad.

## ESTUDIO ECONÓMICO

Es muy difícil realizar un estudio económico a fondo por la falta de datos sobre la fabricación en nuestro país de muchos de los elementos necesarios. Sin embargo, aunque no sea más que de modo aproximado, que, por lo menos, nos permita darnos idea sobre el particular, es conveniente realizar este estudio.

Conviene, desde luego, tener presente que el problema económico es particular de cada país, ya que la rentabilidad de la instalación estará íntimamente ligada al precio del Kw-h. obtenido por otras fuentes de energía, y aún más, a que exista la posibilidad o no de aplicar aquéllas.

El estudio vamos a realizarlo, para una serie de instalaciones de potencias 1 - 5 - 10 - 50 - 100 - 250 - 500 - 750 y 1.000 Kw. suponiendo que han de estar situadas en Las Palmas de Gran Canaria.



Tabla I. - Aprovechamiento de la energía del viento

Po Kw.	$\frac{Po}{S}$ $\frac{\text{Kgm/seg}}{\text{m}^2}$	$\frac{K}{Po} \times 10^6$ $(\text{seg/m})^2$	$K \times 10^3$ $\text{Kg. m}^2 \text{seg}^2$	D m	$Vp^2$ $(\text{m/seg})^2$	$V_{ee}^3$ $(\text{m/seg})^3$	$K \times V_{ee}^3$ Kw.	$Te = K \times V_{ee} \times$ $\times ha$ $Kw - h \times 10^3$
1	30	833	0,833	2,08	1.200	687	0,572	5,01
	46,1	543	0,543	1,67	1.840	975	0,530	4,64
	80	313	0,313	1,27	3.200	1.457	0,455	3,98
5	30	833	4,17	4,65			2,86	25,0
	46,1	543	2,72	3,74			2,65	23,2
	80	313	1,565	2,85			2,28	20,0
10	30	833	8,33	6,57			5,72	50,1
	46,1	543	5,43	5,29			5,30	46,4
	80	313	3,13	4,03			4,55	39,8
50	30	833	41,7	14,7			28,6	250
	46,1	543	27,2	11,8			26,5	232
	80	313	15,65	9,00			22,8	200
100	30	833	83,3	20,8			57,2	501
	46,1	543	54,3	16,75			53,0	464
	80	313	31,3	12,75			45,5	398
250	30	833	208	32,9			143	1.255
	46,1	543	136	26,5			133	1.170
	80	313	78,2	20,1			114	1.000
500	30	833	417	46,5			286	2.500
	46,1	543	272	37,4			265	2.320
	80	313	156,5	28,5			228	2.000
750	30	833	625	57,0			429	3.760
	46,1	543	408	45,8			398	3.480
	80	313	235	34,9			342	2.990
1.000	30	833	833	65,7			572	5.010
	46,1	543	543	52,9			530	4.640
	80	313	313	40,3			455	3.980



Tabla II. - Aprovechamiento de la energía del viento

Po Kw.	D m	Palas Ptas.	Buje Ptas.	R. P. M.	r	Multiplicador Ptas.	$H \approx \frac{D}{2} + 10$ m	Generador Ptas.	Torre y cimentación Ptas.
1	2,08	3.660	10.400	780	1,47	2.000	11	7.000	11.000
	1,67	2.630	10.400	972	1,18	0	11	7.000	10.500
	1,27	1.740	10.400	1.280	0,90	0	11	7.000	10.500
5	4,65	12.000	27.400	349	3,30	3.600	12,50	17.000	11.100
	3,74	8.800	27.400	434	2,65	3.110	12	17.000	11.000
	2,85	5.830	27.400	570	2,02	2.630	11,50	17.000	10.500
10	6,57	20.000	41.300	247	4,66	6.550	13	30.000	14.000
	5,29	14.500	41.300	307	3,74	5.700	12,5	30.000	13.000
	4,03	9.750	41.300	403	2,85	4.800	12	30.000	12.000
50	14,7	67.500	108.000	110	9,10	24.700	17,5	35.000	22.000
	11,8	49.000	108.000	138	7,25	21.400	16	35.000	19.800
	9,00	32.400	108.000	180	5,56	18.200	14,5	35.000	18.000
100	28,8	115.000	164.000	78	12,82	45.600	20,5	55.000	30.300
	16,75	82.500	164.000	97	10,31	39.800	18,5	55.000	28.100
	12,75	54.500	164.000	127	7,88	33.200	16,5	55.000	27.000
250	32,9	228.000	283.000	49,3	15,22	83.600	26	120.000	61.800
	26,5	163.000	283.000	61,2	12,27	72.500	23	120.000	54.200
	20,1	107.500	283.000	80,7	9,30	61.000	20	120.000	46.500
500	46,6	380.000	430.000	34,9	21,50	163.000	33	225.000	121.500
	37,4	274.000	430.000	43,4	17,30	136.000	28,5	225.000	105.000
	28,5	184.000	430.000	57	13,17	114.000	24	225.000	88.500
750	57,0	513.000	552.000	28,5	26,30	222.000	38,5	300.000	191.900
	45,8	372.000	552.000	35,4	21,20	193.000	33	300.000	163.800
	34,9	248.000	552.000	46,5	16,13	162.000	27,5	300.000	136.500
1.000	65,7	642.000	655.000	24,7	30,40	289.000	43	400.000	270.000
	52,9	460.000	655.000	30,7	24,40	249.000	36,5	400.000	230.000
	40,3	307.000	655.000	40,3	18,60	208.000	30	400.000	190.800

Plataf. Acop. Otros Ptas.	Precio total elementos Ptas.	Precio total unitario Instalación Ptas.	Unidades serie Prevista	Gastos de proyecto y ex- perimentación Ptas. $\times 10^{-6}$	Precio unidad serie Ptas.	Gastos anuales $\approx 0,20$ Pu Ptas.	Precio Kw instalado Ptas.	Precio/Kw - h producido Ptas.
765	34.825	40.000	1.000	1,0	41.000	8.200	41.000	1,64
	31.295	35.900		»	36.900	7.370	36.900	1,59
	30.405	35.000		»	36.000	7.200	36.000	1,81
3.850	74.950	86.100	500	»	88.100	17.600	17.500	0,704
	71.160	81.800		»	83.800	16.800	18.000	0,724
	67.210	77.200		»	79.200	15.800	15.900	0,790
7.650	119.500	137.300	200	»	142.300	28.500	14.200	0,569
	112.150	129.000		»	134.000	26.800	13.400	0,578
	105.500	121.200		»	126.200	25.300	12.620	0,636
38.500	295.700	339.000	100	1,5	354.000	71.000	7.100	0,284
	271.700	312.000		»	327.000	65.300	6.550	0,282
	250.100	288.000		»	303.000	60.600	6.050	0,303
76.500	486.400	558.000	50	»	588.000	118.000	5.880	0,236
	445.900	512.000		»	542.000	108.000	5.420	0,233
	410.200	472.000		»	502.000	100.000	5.020	0,251
192.000	968.400	1.100.000	60	2,0	1.133.000	227.000	4.530	0,181
	884.700	1.015.000		»	1.048.000	209.000	4.190	0,179
	810.000	920.000		»	953.000	191.000	3.810	0,191
385.000	1.704.500	1.960.000	30	2,0	2.026.000	405.000	4.050	0,162
	1.555.000	1.787.000		»	1.853.000	370.000	3.710	0,160
	1.426.500	1.640.000		»	1.706.000	341.000	3.410	0,1705
575.000	2.353.900	2.700.000	20	2,0	2.800.000	560.000	3.730	0,149
	2.155.800	2.470.000		»	2.570.000	514.000	3.430	0,148
	1.973.500	2.270.000		»	2.370.000	474.000	3.160	0,159
765.000	3.021.000	3.475.000	15	2,0	3.608.000	721.000	3.608	0,144
	2.759.000	3.170.000		»	3.303.000	660.000	3.303	0,142
	2.525.800	2.900.000		»	3.033.000	606.000	3.033	0,152



Suponemos que el rendimiento total de la instalación es  $\eta = 0,2$ .

Para todas las instalaciones tomamos como velocidades de proyecto:

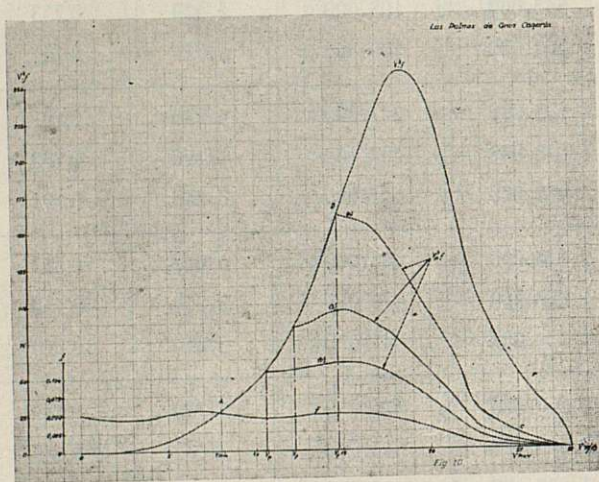
$$V_p = 10,63 \text{ m/s. } 12,25 \text{ m/s. } 14,73 \text{ m/s.}$$

y como velocidades mínimas de arranque, y máxima de funcionamiento o de desconexión,

$$V_a = 8 \text{ m/s. } V_D = 25 \text{ m/s.}$$

Sin duda, para las pequeñas potencias, la velocidad mínima elegida es demasiado alta, probablemente, una de 5 m/s sería más adecuada, pero puesto que, como ya hemos dicho, el problema estudiado es únicamente como guía, no hemos tenido inconveniente en adoptar el mencionado valor, que es el adecuado para las grandes potencias.

Las curvas de velocidades de viento no son realmente las obtenidas del Servicio Meteorológico, ya que, según hemos indicado, con una buena elección del terreno se pueden llegar a aumentos en la velocidad del viento del 60 %. Aquí suponemos que el sitio elegido permite un aumento en la velocidad del viento del 50 %. La curva obtenida con esta modificación es la A (fig. 10).



Curvas de frecuencia de velocidad del viento y  $V^3$ .  
Fig. 10

Las velocidades energéticas medias efectivas, de acuerdo con dichas curvas del viento, son

$$V_e = 8,83 \text{ m/s. } 9,92 \text{ m/s. } 11,34 \text{ m/s.}$$

Igualmente, y de acuerdo con los valores fijados para  $V_p$ ,  $V_{\min}$  y  $V_{\max}$  la regularidad toma los valores

$$r = 49,2 \% \quad 41,7 \% \quad 29,5 \%$$

Con arreglo a estos valores se han determinado en la Tabla I los Kw-hora producidos anualmente, por las distintas centrales, para los tres valores diferentes de  $V_p$  elegidos.

De los valores obtenidos se desprende que no podemos superar la regularidad del 50 %, a menos que se llegue a diámetros realmente exagerados. Por otra parte, como veremos a continuación, puede no resultar más económica la solución de mayor regularidad, ya que el aumento de Kw-hora puede estar superado con exceso por el mayor gasto de la instalación al aumentar el diámetro.

Como veremos al final de este estudio económico, resulta, como solución más económica, la correspondiente a la velocidad de 12 m/s., a pesar de que su regularidad no llega al 40 %.

Por esto se comprende que, según sean las necesidades eléctricas de cada región, así debe ser la solución adoptada, ya que, en ocasiones, puede ser conveniente tomar como solución la de mayor regularidad, aunque sea más cara, ya que con ella dispondremos de mayor cantidad de energía eléctrica.

Una vez estudiada la producción anual de energía de las diversas instalaciones, vamos a considerar sus costes iniciales, para lo cual dividiremos el conjunto de aquéllas en grupos elementales, cuyos precios pueden determinarse en función de un reducido número de variables (una, o, a lo sumo, dos) fundamentales.

Los grupos considerados son los siguientes:

- Palas } Molinete.
- Buje }
- Multiplicador.
- Acoplamiento.
- Generador.
- Plataforma.
- Torre y cimentación.
- Dirección obra, transporte y erección.
- Varios (rodamientos, interruptores, etc.).
- Gastos de proyecto y experimentación.

Con esta hipótesis, y conociendo el precio de varias unidades realizadas de cada uno de los elementos antes citados, hemos obtenido la ley de variación de sus precios unitarios que, para un estudio de carácter general, pueden considerarse con aproximación suficiente a la realidad.

Los valores en pesetas obtenidos para dichos pre-



cios unitarios son los que a continuación expresamos:

Palas ... ..  $p = 700 B^{0.5} D^{1.5}$ .  
 Buje ... ..  $p = 4300 B^{0.8} P^{0.6}$ .  
 Multiplicador... ..  $p = 670 P^{0.56} \cdot r^{0.64}$  (sólo  $p^a$  r 2).  
 Acoplamiento ... ..  $p = 65$  P.  
 Generador ... .. precio de cada uno en la tabla III.  
 Plataforma ... ..  $p = 480$  P.  
 Torre y cimentación.  $p = 1000 H (1 + 0,0053 P) H = 10 + \frac{D}{2}$ .

Varios (rodamientos, interruptores, etc.).  $p = 220$  P.  
 Dirección, transporte y erección ... ..  $p = 15$  % de la suma de los valores anteriores.  
 Gastos de proyecto y experimentación ... indicados en la tabla II para cada caso.

Siendo en las expresiones anteriores:

$p$  = Precio unitario, en pesetas.

$P$  = Potencia instalada, en Kw.

$D$  = Diámetro de la turbina en m.

$B$  = Número de palas de la turbina.

$H$  = Altura de la torre, en m.  $H = (\frac{D}{2} + 10)$  m.

$r$  = Relación de velocidad de salida a velocidad de entrada.

No obstante, como los valores obtenidos pueden variar de modo apreciable como consecuencia de alteraciones en el coste de los materiales, de la mano de obra, etc., para proyectos definitivos, se recomienda pedir presupuestos, por lo menos, de tres tamaños diferentes, convenientemente elegidos, dentro de cada uno de los elementos, a las casas especialistas, con el fin de comprobar o rectificar las leyes de variación de precios que hemos obtenido para los citados elementos.

Respecto a los generadores eléctricos, diremos que las características y precios medios ofrecidos por las casas especialistas son los siguientes:

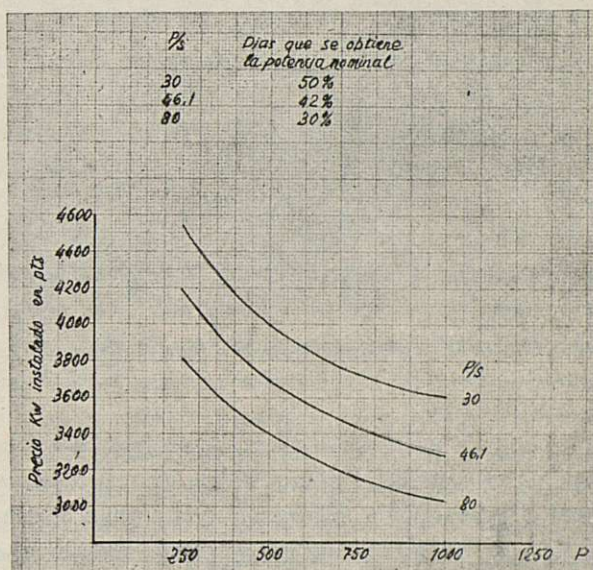
Potencia	Corriente	Tensión	R. P. M.	Precio
1 Kw.	continua	220 v.	1.150	7.000 ptas.
5 »	»	220 »	1.150	17.000 »
10 »	»	220 »	1.150	30.000 »
50 »	trifásica	500 »	1.000	35.000 »
100 »	»	500 »	1.000	55.000 »
250 »	»	500 »	750	120.000 »
500 »	»	3.000 »	750	225.000 »
750 »	»	3.000 »	750	300.000 »
1.000 »	»	3.000 »	750	400.000 »

La determinación del diámetro se efectúa en la tabla II, y para ello se toman como básicos tres valo-

res de la carga específica (relación de la potencia a la superficie del disco del molinete) para cada generador, que cubren ampliamente los márgenes razonables para dicha variable y elegidos de tal modo que el radio intermedio de las tres soluciones que se obtienen para el molinete, dentro de cada potencia, sea la semisuma de los radios correspondientes a los molinetes extremos para cada potencia dada. Estos valores de la carga específica son:

$$P/S = 30, 46,1 \text{ y } 80 \text{ mkg. s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

Los precios obtenidos en la tabla II para el Kw. instalado se han representado en la fig. 11, pero única-



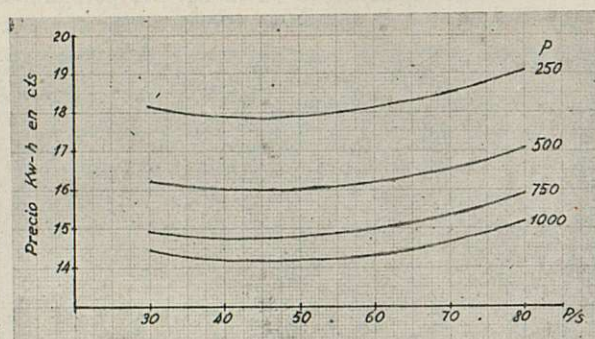
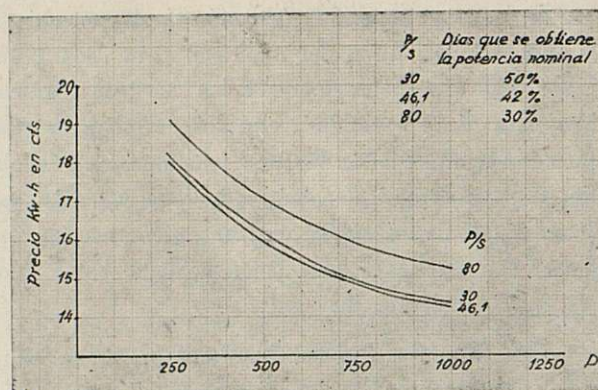
Precio del Kw. instalado en Las Palmas de Gran Canaria.

Fig. 11

mente considerando las potencias comprendidas entre 250 y 1.000 Kw., y se ve que, a medida que aumenta la potencia, disminuye el coste del Kw. instalado. Ahora bien, este decrecimiento no es indefinido y las curvas presentan un mínimo sobre el que influyen diversas variables, pero que orientados por los trabajos americanos sobre la materia, parece que están comprendidos entre los 1.250 y 1.750 Kw.

El coste del Kw-hora se ha representado en la figura 12 en función de la potencia; se observa decrecimiento del primero a medida que aumenta la segunda. También en el citado gráfico queda de manifiesto, por el escalonamiento de las curvas para los diferentes  $P/S$ , que existe un valor comprendido entre  $P/S = 30$





Precio de Kw-h. producido en Las Palmas de Gran Canaria.

Fig. 12

$\text{mkg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  y  $P/S = 80 \text{ mkg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  para el que es mínimo el coste del Kw-hora dentro de una potencia dada. Esta variación aparece más claramente de manifiesto en la fig. J, y en ella se puede apreciar que para potencias de 1.000 Kw. el valor óptimo de la carga específica  $P/S$  está muy próximo a  $46 \text{ mkg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Estos valores obtenidos para el precio del Kw. instalado y del Kw-hora corresponden a instalaciones totalizando 15.000 Kw. con cada uno de los grupos de 250-500-750 y 1.000 Kw. Los datos medios obtenidos para instalaciones térmicas e hidráulicas de potencia análoga nos permiten dar el siguiente resumen:

Concepto	Tipo de instalación		
	Térmica	Hidráulica	Eólica
Precio del Kw. instalado, ptas.	1.500-1.800	5.500-7.000	3.033
Precio del Kw-h. producido, cts.	0,20-0,25	0,10-0,15	14,2

Debemos hacer notar, como fácilmente puede verse en la tabla II, que la potencia más barata de instalar no coincide, precisamente, con la más barata de pro-

ducir, pero podría llegarse a una coincidencia actuando adecuadamente sobre las diversas variables.

Basándonos en cálculos americanos y daneses, a las instalaciones eólicas, para que sean económicas, se les deben exigir las siguientes condiciones:

a) Se deben producir 4.000 Kw-h. por Kw. instalado.

b) El coste de Kw. instalado para grandes potencias debe ser, aproximadamente, 3.000 ptas.

Teóricamente, aunque ello no deba tomarse como artículo de fe, puede calcularse cuál debe ser el radio y el número más conveniente de molinos, para obtener una potencia dada en el supuesto de que el coste de una instalación sea de la forma  $c = ar^3 + br$ . El primer sumando indica la parte proporcional al peso, y el segundo a la altura de la instalación.

Si hacemos  $n$  instalaciones, el coste total será  $C = nc = n(ar^3 + br)$ .

Si se desea obtener una potencia  $P_0$  tendremos  $P_0 = n K r^2 V^3$ .

De estas dos ecuaciones obtenemos

$$C = \frac{KV^3}{P_0} (ar + \frac{b}{r}).$$

Esta expresión será mínima para

$$a - \frac{b}{r^2} = 0, \quad r = \frac{b}{a} \quad \text{y} \quad n = \frac{P_{0a}}{K b V^3}$$

## MEDIOS DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA

Evidentemente, si dispusiéramos de una cuenca aérea donde la frecuencia de vientos correspondiente a la velocidad de proyecto fuese de un 100 %, no necesitaríamos ningún sistema de acumulación, sino únicamente encontrar consumidores de energía. Ahora bien, como hemos repetido en muchas ocasiones, desgraciadamente no sucede así, ya que en los buenos lugares la regularidad oscila en los alrededores del 50 %. Por este motivo, en lugares donde no existan otras instalaciones eléctricas y se desee disponer de este tipo de energía (alumbrado de pequeñas ciudades, etc.) no habrá más remedio que acudir al sistema de acumuladores, que, como sabemos, representan gran gasto no solamente de primera instalación, sino también de entretenimiento. Por esta razón no puede apli-



carse este sistema de acumulación de energía nada más que para potencias pequeñas.

Las centrales aéreas para estas instalaciones con sistemas de acumulación, deberán ser proyectadas para una potencia instantánea superior a la necesaria, con el fin de acumular el exceso y poder hacer el suministro de energía durante el 100 % de los días, independientemente de los días de calma o velocidades pequeñas de viento.

Este problema de acumulación de energía es muy semejante al que se presenta con la energía hidráulica de los ríos, en los que es preciso disponer embalses para tratar de corregir sus intermitencias o irregularidades, si bien con éstos lo que se hace es conseguir que el agua no pierda la energía potencial que lleva, y, en cambio, cuando se trata de centrales eólicas, hay que transformar la energía cinética del viento en energía potencial, para ser aprovechada cuando se desee. Esto, naturalmente, hace que la energía potencial pueda adquirir diversas formas, ya que puede ser eléctrica, térmica, química, mecánica, etc.

Para las instalaciones de gran potencia no hay más solución que conectarlas a redes eléctricas nacionales a las cuales vierten su energía las centrales aéreas, mientras dispongan del viento necesario, ahorrando durante ese tiempo el consumo de agua o combustible en las centrales hidráulicas o térmicas que alimentan aquellas líneas.

Se ha afirmado, y no parece la idea descabellada, que cuando en las proximidades de alguna presa se encuentre lugar adecuado para una central eólica, ésta puede bombear agua tomada aguas abajo de aquella y enviarla nuevamente al embalse. Evidentemente, con este sistema aprovechamos una instalación acumuladora y transformadora, ya existente y en servicio. En este caso la instalación eólica es subsidiaria de la hidráulica. En algunas circunstancias puede operarse a la inversa, es decir, realizar la instalación hidráulica como subsidiaria de la eólica, para aprovechar ciertas condiciones especiales del terreno, permitiendo construir algún embalse en las proximidades del mar, al cual se bombea agua de éste con la que se puede obtener energía eléctrica y aun agua para regadío una vez que fuera convenientemente depurada. Quizá Canarias sea un lugar adecuado para este tipo de instalaciones.

Otro procedimiento de acumulación con grandes po-

sibilidades, consiste en el empleo de la energía excedente de la central eólica, en la descomposición electrolítica del agua y en utilizar el hidrógeno acumulado para mover un motor de combustión acoplado al generador eléctrico del grupo; este motor se hará funcionar cuando el viento no tenga la intensidad suficiente para poner el grupo en servicio. Además de ello, las aplicaciones industriales del hidrógeno y del oxígeno reportarían un beneficio apreciable a la central, gracias a la venta del excedente de dichos gases. Si el agua empleada para la obtención electrolítica del hidrógeno y oxígeno es la del mar, podría hacerse una instalación química aneja para el aprovechamiento residual de dichas aguas.

Obtenida energía eléctrica de la del viento, las posibilidades de transformación y acumulación son prácticamente ilimitadas, pero el «acumulador» más económico es, sin duda, la propia red general, ya que en los momentos de obtención de mucha energía del viento las centrales hidráulicas y térmicas pueden reducir su producción en la medida necesaria y, en los momentos deficitarios, pueden intensificarla en la medida precisa para satisfacer la demanda. Empleando este «acumulador» se evitan, además, las pérdidas del ciclo de transformación, acumulación y nueva transformación en energía eléctrica, que llevan consigo los demás sistemas. Estimamos que las dificultades de orden técnico y legal que surjan con la aplicación de este sistema pueden ser vencidas y que debe trabajarse en este sentido, ya que redundaría en mayor aprovechamiento del conjunto de la potencia instalada.

## FUTURO DE LA ENERGÍA DEL VIENTO

Es sabido que la misión de profeta es una de las más difíciles y atrevidas del género humano; por ello, me libraré muy mucho de sentar aseveraciones categóricas sobre cuál será el futuro de la energía eólica, pero, naturalmente, ello tampoco debe ser obstáculo para hacer una serie de sugerencias, que, si bien no pueden fijar de manera concreta ese futuro, sí podrán darnos alguna luz sobre él.

Evidentemente, el futuro de la energía eólica está íntimamente ligado con las demás fuentes de energía y con la vida de la Humanidad. Si aquéllas son reducidas con respecto a ésta, no cabe duda de que llegará el día que hará falta hacer uso en gran escala de la



energía considerada. Ahora bien, si hacemos caso a J. B. S. Haldane, nunca los habitantes de la Tierra han creído que la vida de ellos pasara de un millón de años, y la cantidad de energía disipada respecto a la disponible será siempre ridícula. Hagamos un ligero examen de los tipos de energía disponible que conocemos en la actualidad, así como de sus posibilidades de aprovechamiento.

*Energía solar.*—La energía disponible de la radiación solar es realmente colosal, pero no parece que en un futuro próximo pueda aprovecharse, económicamente, cantidad apreciable de ella. Se han realizado algunos experimentos con relativo buen éxito en los desiertos situados en latitudes bajas.

*Energía del mar.*—Han sido muchas las investigaciones y experimentos que se han realizado para el aprovechamiento de la energía de las olas y de las mareas, pero no parece que ellas hayan dado resultados esperanzadores desde el punto de vista económico, tanto por su falta de regularidad, como por los enormes gastos de entretenimiento ocasionados por los temporales y por los grandes desembolsos iniciales.

*Energía térmica.*—La energía térmica, mediante la combustión de petróleos o carbones, no cabe duda es una de las más explotadas por el hombre, ni de que aumenta día en día su producción, a causa de la demanda creciente que exige el estado actual de la civilización mundial. Ella tiene su principal ventaja en su regularidad, ya que, lógicamente, puede disponerse de ella cuando se desea. Ahora bien, tiene el inconveniente de que las reservas mundiales, tanto de los combustibles sólidos como de los líquidos, están sufriendo merma muy considerable, y que la explotación, principalmente en lo que a los carbones se refiere, es de día en día menos económica, a causa de los elevados jornales necesarios para mantener un personal especializado, en trabajos tan duros como son los de las minas de carbón, así como por el hecho de que, lógicamente, cada día los yacimientos futuros serán de más complicada explotación, ya que siempre los que se encuentran más cerca de la superficie serán los primeros en agotarse.

Hay geólogos que aseguran, de acuerdo con las existencias que entienden existen en el mundo, y con el consumo futuro del carbón, que las reservas no son superiores a 200 años. De cualquier manera, no cabe duda de que este lapso dependerá mucho del país con-

siderado, ya que es probable que los países que dispongan de mayores cantidades de combustible, cuando crean que está próximo su agotamiento, no quieran exportarlo a los otros.

El problema del petróleo, según los técnicos en la materia, parece aún más apremiante, ya que, además, se trata de un producto mucho más raro que el carbón. Además, el aumento de consumo de este combustible es aún mucho mayor que el del carbón. Por ello, algunos opinan que los campos petrolíferos mundiales no tendrán una vida superior a los 50 años.

Por otra parte, las guerras, que, probablemente, no ejercerán gran influencia sobre los yacimientos carboníferos, pueden ejercerla de manera catastrófica sobre los campos petrolíferos.

*Energía hidráulica.*—Esta energía suministra al hombre un tanto por ciento muy elevado de la consumida por él. Como las anteriores, está íntimamente ligada a condiciones particulares de cada país, ya que depende extraordinariamente del clima y del relieve del suelo. Así, por ejemplo, vemos que Suiza y los Países Escandinavos son extraordinarios en este aspecto, pero, desgraciadamente, no sucede lo mismo con el nuestro.

Evidentemente, dentro de cierto grado de exactitud, puede determinarse la energía mundial conociendo el total del agua que va al mar o a los lagos, y la diferencia de nivel. Así, según algunos autores, la energía hidráulica total del mundo es de unos  $5 \times 10^8$  Kw., de la cual aproximadamente se encuentra el 15 %. Por otra parte, se comprende que gran parte de la que aún queda por explotar, quizá no sea aprovechable económicamente, ya que pueden ser necesarias enormes redes de transporte. Además, en este caso, pueden aparecer dificultades de orden internacional, al tener que atravesar estas redes distintos países.

*Energía nuclear.*—Para que esta nueva fuente de energía pueda aplicarse económicamente, será preciso que se produzcan avances básicos de orden físico, químico y metalúrgico. Algunos cálculos aproximados, realizados por personas competentes en la materia, llegan a fijar en unos 300 dólares por Kw. en una instalación de 100.000 Kws.

Parece que, en un futuro próximo, esta energía no podrá desplazar a las térmicas, hidráulica ni eólica.

*Energía eólica.*—Del mismo modo que hemos determinado la potencia hidráulica mundial, puede determinarse la eólica, ya que se conoce, aproximadamente, la



vena flúida sobre la Tierra y su velocidad. Así, Brunt determina que la potencia total eólica en la atmósfera es del orden de  $3 \times 10^7$  Kws. Desde luego, no toda esta energía puede ser aprovechable por el hombre, por disponerse de ella a grandes alturas. Esto ha dado lugar a que Willet valore la energía eólica disponible en unos  $2 \times 10^{10}$  Kws.

Es claro, que para fijar qué parte de ésta puede obtenerse en cada país será preciso hacer los estudios que ya hemos mencionado. No cabe duda de que con separar seguramente unas 5 ó 6 veces el diámetro los diversos aeromotores para que no ejerzan perturbaciones unos sobre otros, podrá llegarse en el futuro a obtener del viento una energía superior a la que se puede obtener del agua.

Como ya hemos indicado repetidas veces, el problema será, sin duda alguna, de orden económico, y, por lo tanto, si se comprueba, como parece, que existen en nuestro país regiones en las cuales las condiciones eólicas son muy semejantes, esto facilitará la resolución del problema, ya que podrán fabricarse instalaciones en serie, con la consiguiente disminución de su precio inicial. De los estudios hasta ahora realizados, parece desprenderse que las instalaciones de potencia eólica, deben dividirse en cuatro grupos:

1.º *Gran potencia*.—Estas instalaciones deben comprender las potencias entre 2.000 y 3.000 Kws., y ser conectadas a otras centrales existentes, térmicas o hidráulicas. Deben situarse cerca de grandes centros de consumo, con regímenes de viento apropiado, que, como norma general, puede decirse, se encuentran entre las latitudes de 30 y 60º al Norte y Sur.

En el mundo se podrían obtener de estas instalaciones de  $1 \times 10^6$  a  $10 \times 10^6$  Kws.

2.º *Potencia media*.—Estas instalaciones deben comprender potencias entre 100 y 500 Kws., y funcionar conectadas a pequeñas estaciones hidroeléctricas o térmicas en lugares aislados, tales como las islas Canarias, Orcadas, Shetlands, etc. Seguramente podría llegarse a una potencia total mundial no inferior a  $2 \times 10^6$  Kilovatios.

3.º *Pequeña potencia*.—Estas instalaciones comprenden las potencias entre 1 y 10 Kws., y, naturalmente, su instalación debe ser más limitada, y pueden ser empleadas, por ejemplo, para la carga de ba-

terías en las regiones polares o desérticas, o en fincas privadas, con grandes instalaciones de comodidad.

4.º *Muy pequeña potencia*.—Estas instalaciones comprenden las potencias hasta 1 Kw. Su empleo se extiende cada día más para las fincas de campo, principalmente las alejadas de las líneas eléctricas. Sin duda, con ellas se llegará, en plazo no muy lejano, a una potencia no inferior a  $2 \times 10^6$  Kws.

El experimento de Grandpa Knob ha comprobado que los problemas técnicos para instalaciones de 1.250 Kws. de potencia unitaria son perfectamente conocidos, y queda únicamente por resolver el económico, para que el precio por Kw. instalado sea semejante al de otros tipos de energía. Evidentemente, para la resolución de este problema, es imprescindible la ayuda del Estado, aun en los países más ricos.

## CONCLUSIONES

Como resumen de todo lo expuesto, se desprende que el verdadero fin que se busca con este trabajo no es colocarnos en falsas posiciones utópicas de suponer que ya tenemos resuelto el problema de la energía eléctrica, sino que, por quien corresponda, se tome en consideración el problema expuesto, como ocurre en otros países, ya que no cabe duda de que, en plazo no lejano, seguramente en ellos estará perfectamente resuelto, y es totalmente necesario que nosotros tengamos, por lo menos, realizado un estudio a fondo de los lugares más apropiado para este tipo de instalaciones.

Por lo tanto, parece que el camino debe ser:

1.º Estudio a fondo del régimen local de vientos, en puntos de las zonas indicadas como más interesantes en el estudio general; es decir, Finisterre, Bagur, Estrecho (incluyendo Norte de África y Canarias), con el fin de obtener la velocidad media energética.

Para este fin puede seguirse el camino aconsejado en Francia por P. Ailleret, y seguido por «Electricité de France» de instalar en puntos tan abundantes como sea posible del país, molinetes integradores que permitan determinar la velocidad media energética y, por lo tanto, la potencia que se podría obtener del viento con un diámetro determinado de molinete.



Evidentemente, esto constituirá la primera tentativa seria en el camino del aprovechamiento de la energía eólica en nuestro país.

- 2.º Adquisición de alguna instalación extranjera de potencia media, de solvencia reconocida, para instalarla en los lugares que se hayan establecido como más adecuados.

- 3.º Durante el tiempo en que se realicen estos estudios e instalaciones, probablemente estará resuelto en el extranjero el problema de las grandes potencias, y, entonces, ya con la experiencia por nosotros adquirida, estaremos en inmejorables condiciones para elegir la más adecuada de las soluciones obtenidas.

---

*Al final de esta exposición el Sr. Presidente manifiesta que, según su criterio, dada la evidente relación que, en ciertos aspectos, presentan los dos últimos trabajos leídos de los Sres. Lorente y Lafita, sería de gran utilidad que, mediante una colaboración entre sus respectivos autores, se alcanzara la mayor unificación de criterios en las conclusiones establecidas en los mismos, y así se acuerda por los reunidos.*

*La presidencia concede después la palabra al autor de la comunicación siguiente núm. 256 que es leída por el mismo.*



## N.º 256. - Potencia radiactiva natural

Autor: JUAN MANUEL LÓPEZ DE AZCONA

Ingeniero de Minas y Doctor en Ciencias

Para calcular la potencia radiactiva natural es preciso conocer las reservas planetarias de elementos radiactivos y totalizar la potencia a que puede dar lugar cada uno de ellos.

### RESERVAS PLANETARIAS DE ELEMENTOS RADIATIVOS

Los diversos elementos radiactivos naturales hoy existentes son:

$K^{40}$ ,  $Rb^{87}$ ,  $In^{115}$ ,  $La^{138}$ ,  $Sm^{147}$ ,  $Lu^{176}$ ,  $Re^{187}$ ,  $Th^{232}$ ,  $U^{235}$  y  $U^{238}$ .

Su contenido en la tierra es función del tiempo, ya que al formarse la corteza hace 3.300 m. a. las reservas eran superiores a las actuales, por haberse desin-

tegrado muchos de estos átomos según la fórmula:

$$N_t = N_0 \exp (-\lambda \times t)$$

en ella  $N_0$  y  $N_t$  representan el número de átomos en el momento de partida y después de transcurridos  $t$  años,  $\lambda$  la probabilidad de transformación del elemento en años recíprocos y  $t$  el número de años que duró la desintegración.

En una obra nuestra damos los cálculos de estas reservas y se establecen para cuatro momentos fundamentales, que son: al formarse los núcleos de los átomos de uranio hace de ello 4.600 m. a., al formarse el planeta 3.300 m. a., cuando se forma el mineral más antiguo 2.000 m. a., y hoy, el contenido en  $10^{18}$ , g de estos elementos en nuestro planeta, según se puede ver en el cuadro que sigue.

Contenido en nuestro planeta de los elementos radiactivos

Elemento	Período en $10^9$ a	PESO EN $10^{18}$ g.			
		Hoy	2,000 m. a.	3,350 m. a.	4,600 m. a.
$K^{40}$ .....	1.5	110	270	497	872
$Rb^{87}$ .....	6.4	270	275	279	283
$In^{115}$ .....	600,000	5.7	5.7	5.7	5.7
$La^{138}$ .....	120	0,178	0,178	0,178	0,178
$Sm^{147}$ .....	320	30	30.2	30.3	30.4
$Lu^{176}$ .....	24	1	1,060	1,102	1,143
$Re^{187}$ .....	4,000	0.03	0.03001	0.03002	0.03003
$Th^{232}$ .....	13.9	1,200	1,326	1,420	1,510
$U^{235}$ .....	0.707	0.7	4.89	21	66
$U^{238}$ .....	4.51	100	135,5	166	200



## CALOR GENERADO POR LOS ELEMENTOS RADIATIVOS

Para conocer en cualquier momento el calor generado durante un año por desintegraciones radiactivas, es preciso saber el generado por cada gramo de isótopo activo. Para deducir el calor generado al año, es preciso conocer la energía media de cada emisión en MeV, multiplicarla por el número de desintegraciones de un gramo durante un año y por el coeficiente de conversión a calorías  $0,382 \times 10^{13}$ . Caso de tra-

tarse de una cadena de desintegraciones en equilibrio radiactivo, como sucede con las familias largas, se toma para valor de la energía la suma de las medias de cada proceso y como número de desintegraciones anuales, las que corresponden al elemento cabeza de familia.

Efectuados los correspondientes cálculos, se obtienen como calores teóricos generados al año, en calorías por gramo de cada isótopo radiactivo, los siguientes:

Calor generado al año en cal/a. por cada gramo de elemento

Elemento	K <sup>40</sup>	Rb <sup>87</sup>	In <sup>115</sup>	La <sup>138</sup>	Sm <sup>147</sup>	Lu <sup>176</sup>	Re <sup>187</sup>	Th <sup>232</sup>	U <sup>235</sup>	U <sup>238</sup>
Calor .....	0.27	0.00023	0.00000021	0.00059	0.00080	0.0019	0.00000061	0.184	4.25	0.716

Por el cuadro se aprecia la existencia de elementos que originan muy poco calor, unos por tener un período muy elevado, como el In<sup>115</sup>, y otros por su proceso poco energético, como sucede al Re<sup>187</sup>. En el caso del U<sup>235</sup>, se da la circunstancia de tener elevada probabilidad de transformación y gran energía; por ello da lugar a 4.25 cal/a. por gramo de U<sup>235</sup> con sus descendientes en equilibrio.

## POTENCIA DE ORIGEN RADIATIVO

Conocido el contenido de cada isótopo radiactivo en cuatro de los momentos esenciales, al multiplicarlos por los valores del cuadro anterior, se obtiene el calor generado por ellos hoy, al formarse el mineral más antiguo, al solidificarse la corteza terrestre y al organizarse los núcleos del uranio en la materia que después había de constituir la Tierra.

Calor de origen radiactivo del planeta en  $10^{15}$  cal/a.

Elemento	Hoy	2,000 m. a.	3,350 m. a.	4,600 m. a.
K <sup>40</sup> .....	29,360	73,000	135,000	235,000
Rb <sup>87</sup> .....	62.1	63.2	64.2	65.1
In <sup>115</sup> .....	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012
La <sup>138</sup> .....	0.105	0.105	0.105	0.105
Sm <sup>147</sup> .....	24	24	24	24
Lu <sup>176</sup> .....	1.9	0.02	2.10	2.18
Re <sup>187</sup> .....	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002
Th <sup>232</sup> .....	220,800	243,900	261,300	277,700
U <sup>235</sup> .....	2,975	20,780	89,250	280,500
U <sup>238</sup> .....	71,600	97,000	188,800	142,200
Total .....	324,000	434,000	673,000	935,000



En este cálculo sólo existen actualmente dos elementos que desempeñan papel significativo, que son el  $\text{Th}^{232}$  y el  $\text{U}^{238}$ , mientras que en el pasado hubo otros que también tuvieron parte activa en el caldeo de la masa terrestre, fundamentalmente el  $\text{U}^{235}$  y el  $\text{K}^{40}$ .

De las cifras anteriores se establecen algunas consideraciones de interés: desde hace 3.300 millones de años, el calor generado no disminuyó tan rápidamente como suponen muchos geofísicos. El  $\text{K}^{40}$ , por ejemplo, generaba al formarse la corteza terrestre  $135 \times 10^{18}$  cal/a., o sea del orden de 1/3 del producido actualmente por todos los elementos radiactivos. El calor radiogénico total, hace 3.300 millones de años, era ligeramente superior al doble del actual; esta disminución del calor, a la que acompañaba un lento enfriamiento de la materia, que ya hacía varios millones de años que venía experimentándolo, fué la causa de que comenzara la solidificación de la corteza.

El calor radiactivo generado al formarse los núcleos del uranio era considerablemente mayor que el consignado en el cuadro anterior, debido a la desintegración de las familias hoy extinguidas, que tenían la particularidad de corresponder a períodos pequeños, y por ese motivo el calor generador era extraordinariamente significativo en el balance. Como ejemplo, solo nos referimos a la familia  $4n + 1$ ; el  $\text{Bi}^{209}$  supone produce del  $\text{U}^{235}$  y que el contenido de éste, aplicando los valores recopilados por Suess (1949) fué de  $100 \times 10^{18}$  g., o sea del orden del uranio existente en la actualidad. Como cada gramo de  $\text{U}^{235}$  con sus descendientes en equilibrio generaba al año 17,100 c., cantidad considerable por el pequeño período de  $160 \times 10^3$  a., el total de  $\text{U}^{235}$  existente daba lugar a la enorme cifra de  $171.000.000 \times 10^{15}$  c/a.,

verdaderamente formidable, que la urano-física no tenía en cuenta en los balances térmicos.

Además de este calor se debe tener en cuenta el originado en aquel entonces por las evoluciones de los transuránicos Np, Pu, Am, Cm, Bk, y Cf, que por sus períodos pequeños dieron lugar a que figurasen el  $\text{Th}^{232}$ ,  $\text{U}^{235}$  y  $\text{U}^{238}$  como cabezas de las familias radiactivas, aunque sólo sean aparentemente. Estos elementos no tienen importancia en los balances actuales, porque además de existir en pequenísimas cantidades, se están generando en la actualidad, a costa de partidas que figuran en nuestro balance por otros conceptos.

## RESERVAS DE ENERGIA RADIATIVAS

La potencia radiactiva anual pasó de más de  $200 \times 10^{20}$  Kw/a. al formarse los núcleos de uranio a  $0.7 \times 10^{20}$  Kw/a., cuando comenzó la consolidación terrestre. Terminada la desintegración de los elementos de período corto, la potencia se redujo considerablemente; como se ve por los datos consignados; a partir de ese momento la disminución fué más lenta, y así se ve era del orden de  $0.4 \times 10^{20}$  Kw/a. cuando se formaron los minerales más antiguos de los hoy conocidos y de  $0.3 \times 10^{20}$  Kw/a. en la actualidad.

Esta potencia disminuye constantemente al disminuir el número de átomos radiactivos, y llegará momento en que se alcance su extinción.

Surge la necesidad, en vista de esta disminución constante de la potencia radiactiva de nuestro planeta, de saber cuál es la energía radiactiva disponible. La de cada gramo de elemento se calcula aproximadamente al multiplicar la general del año por la vida media en años de los átomos.

Energía disponible por gramo de elemento en  $10^9$  cal.

Elemento	$\text{K}^{40}$	$\text{Rb}^{87}$	$\text{In}^{115}$	$\text{La}^{138}$	$\text{Sm}^{147}$	$\text{Lu}^{176}$	$\text{Re}^{187}$	$\text{Th}^{232}$	$\text{U}^{235}$	$\text{U}^{238}$
Calor .....	0.58	0.02	0.19	0.09	0.35	0.07	0.003	3.60	2.90	4.60

*Multiplicados estos valores por las existencias actuales de cada elemento, se obtiene la energía total planetaria posible.*



Energía total disponible en  $10^{30}$  cal.

Elemento	K <sup>40</sup>	Rb <sup>87</sup>	In <sup>115</sup>	La <sup>138</sup>	Sm <sup>142</sup>	Lu <sup>176</sup>	Re <sup>187</sup>	Th <sup>232</sup>	U <sup>235</sup>	U <sup>238</sup>	Total
Calor .....	0.064	0.005	0.001	0.00002	0.010	0.00007	0.0000001	0.320	0.002	0.460	4.866

Las reservas de energía radiactiva natural del planeta correspondiente a los  $2 \times 10^{18}$  Kg. de elementos, representan  $5 \times 10^{30}$  cal., cantidad que puede ser aumentada considerablemente si se aplica en algunos de los elementos las técnicas de escisión. La fracción de

aplicación industrial de esta enorme cantidad de energía se reduce a una pequeña parte, por dos causas: gran dispersión de los elementos que la originan, y dificultad de acceso por nuestros medios a profundidades de la corteza superiores a unos hectómetros.

---

*Tras la comunicación anterior, el Sr. Secretario lee el resumen del siguiente trabajo núm. 60.*



### N.º 6o. - Aprovechamiento racional de la energía de los ríos. Centrales situadas por debajo del nivel del río o saltos subterráneos

Autor: D. JOSÉ ÁLVAREZ VALDÉS

Ingeniero Industrial

NECESIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA, TÉRMICA E HIDRÁULICA.—Es preciso evitar que un día y otro los organismos oficiales estén dedicados a redactar notas imponiendo restricciones en el consumo de energía eléctrica, que son causa de que el pueblo español permanezca en la inacción gran parte del año y de que no puedan autorizarse nuevas industrias o se autoricen con tales limitaciones que equivalen a condenarlas a existencia raquítica. La vida industrial, mercantil y doméstica, deben disponer, sin tasa ni medida, de aquel elemento básico, que le da fuerza, calor y luz. Sin él, no hay más que el espectáculo de fábricas paradas, ciudades en tinieblas y técnicos que no pueden promover sus concepciones. Y, para ello, es necesario cultivar las fuerzas generadoras de aquéllas, las hoy conocidas. Mañana serán otras, pues ya la ciencia aflora en su infinito campo nuevas contribuciones a tan importante objeto o fin.

Debiera ser plan inmediato de los Poderes públicos doblar o triplicar la producción de esta energía, substancia o esencia, como antes decimos, de la vida industrial de los pueblos, y, por tanto, aumentar en la misma proporción el arranque de hulla negra y el aprovechamiento de la blanca. Pensar en nuevas y

grandes electrificaciones antes de resolver este problema en la escala que apuntamos, es vivir fuera de la realidad, para estrellarse luego contra ella. En el subsuelo de nuestra patria existente, bien reconocido, miles de millones de toneladas de aquélla; resulta, pues, muy exigua la extracción anual de doce millones. Este incremento beneficiaría a la industria en general, especialmente a la siderurgia; otro de los fundamentos o base de la economía nacional. La escasez de carbón, hierro y energía eléctrica nos asfixia industrialmente.

He aquí el consumo por habitante y año, en Kw-h., en los países que se expresan a continuación, referentes al 1948:

Canadá ... ..	3.910
Noruega ... ..	3.780
Estados Unidos ... ..	1.940
Suiza ... ..	1.920
Suecia ... ..	1.830
Inglaterra ... ..	1.130
Bélgica ... ..	870
Francia ... ..	640
Alemania ... ..	480
Austria ... ..	460
Checoslovaquia ... ..	450
Japón ... ..	420
Italia ... ..	410
Holanda ... ..	390
España ... ..	250



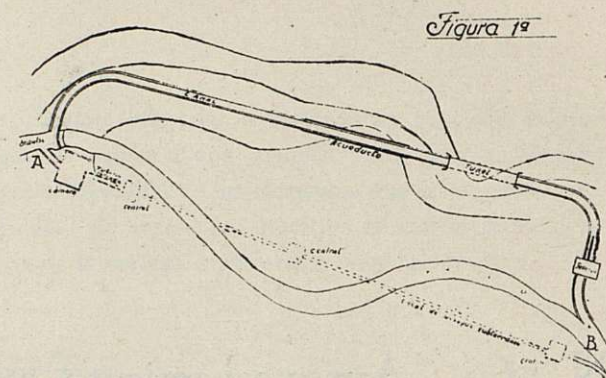
Las cifras copiadas expresan lo deficiente de la situación española en esta rama de la ingeniería; ellas nos dan la medida de lo que aún nos falta por hacer. Triplicando los 250 Kwh. consignados, seguimos muy por debajo en la tabla que precede. Las perspectivas en esta materia son, pues, poco lisonjeras. Sin embargo, es de hombres animosos esforzarse en mejorarlas; *pudiera constituir una anhelante aspiración de los ingenieros reunidos en este Congreso.*

Aunque no nos sea posible traducirlo a números, vamos a ocuparnos en nuestro modesto trabajo del aumento de energía que podría captarse en las cuencas fluviales con un aprovechamiento racional de sus factores naturales (altura y caudal), estudiando principalmente el primero. Es preciso que el río, el generador más económico de energía, distribuido por todos los países y perecedero sólo con el hombre, no se rinda al mar sin antes devolver el poder que en sí tiene. Con frecuencia se dice que los ríos, bajo este aspecto, están esquilados. Esto es cierto si se atiende al procedimiento seguido hasta ahora en la construcción de saltos; pero, con arreglo a la técnica que en esta materia propugnamos, puede decirse que están vírgenes. Embalses y cadenas de saltos permitirán sacar de toda cuenca un buen rendimiento.

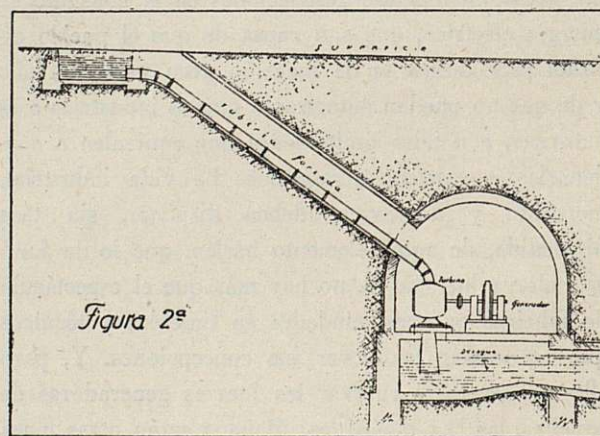
**SALTOS SUPERFICIALES, MIXTOS Y SUBTERRÁNEOS.**—La altura de los actuales saltos de agua superficiales está limitada por la de las montañas que sirven de asiento a los canales de su llegada, o, en los grandes embalses, de recipiente de éstos y estribos de las presas, o por barrancos o quebraduras del terreno, ante lo que es necesario detener la construcción de aquéllos, pues, muchas veces, el paso de estos accidentes mediante acueductos y sifones es costosísimo y, en ocasiones, insuperable. En otros casos, abre tanto el valle que los canales que siguieran la ladera adquirirían gran longitud. También suele tropezarse con el obstáculo de puentes, caminos, vías férreas y otros muchos que para salvarlos, cuando es posible, hay que dar gran desarrollo al canal y realizar obras de gran importancia. En terrenos llanos no se pueden construir saltos de gran altura según el procedimiento empleado hasta ahora, pues falta la montaña, elemento primordial de los mismos. Todo es causa de que, recorriendo el cauce de un río, se encuentren pocos lugares adecuados para la instalación de saltos de importancia y de que se vean, con intermitencias, instala-

ciones de poca altura que sólo utilizan una mínima parte del desnivel y fuerza existentes.

La mitad superior de la figura 1.<sup>a</sup> representa el esquema de un salto entre los puntos A y B de un río.



Producido el embalse, se deriva el agua por un canal que sigue aproximadamente una línea de nivel y se apoya en la ladera más conveniente (en la izquierda en nuestro estudio). Este canal suele estar descubierto o protegido contra los desprendimientos de tierras y contar con acueductos, sifones y túneles en carga o sin ella, y al final del mismo se encuentra la cámara de agua, tubería forzada, central y canal de desagüe. Es el procedimiento seguido hasta ahora.



En la misma figura, por la margen derecha, se presenta una derivación del dicho embalse que, a muy poca distancia de él, se hace terminar en la cámara de agua, de la que parte la tubería forzada que conduce a las turbinas, situadas, como las demás máquinas, figura 2.<sup>a</sup>, en la central excavada a la profundidad que se necesite para ganar, contando la pérdida de



altura en el canal de desagüe, el desnivel entre A y B. Es decir, que aquí tenemos los siguientes elementos: presa, un corto canal de derivación, cámara y tubería forzada, situada en un pozo más o menos inclinado; la central y el desagüe por túnel en recta hasta el punto de unión con el río. Éste es el que llamamos salto subterráneo. La central puede también situarse en B o un punto más alto, de modo que trabaje el túnel a presión o en vena libre, total o parcialmente, según la posición de aquélla.

Para mejor hacernos entender, dividiremos los saltos en tres clases, cuyos esquemas pueden verse en

## Esquemas

Fig. 3ª

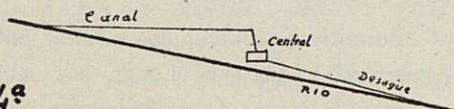


Fig. 4ª

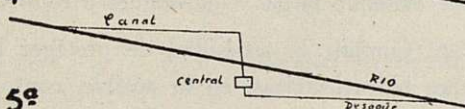


Fig. 5ª

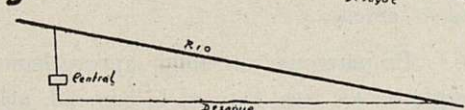
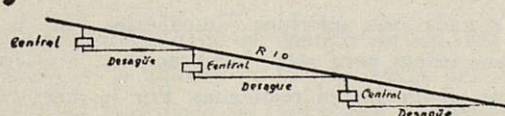


Fig. 6ª



los esquemas o figuras 3.ª, 4.ª y 5.ª, a los que denominamos, respectivamente,

Salto superficiales,

Salto mixtos,

Salto subterráneos.

En los primeros, que son los corrientes, todos los elementos que integran el salto se hallan por encima del nivel del río; en los segundos, se lleva el canal de derivación por la ladera hasta la cima de la misma o un accidente u obstáculo difícil de salvar y, si aún no se ha ganado la altura que se desea, se penetra en tierra con la tubería forzada hasta conseguirla, y se da salida al agua por un canal subterráneo. En los

terceros, en las inmediaciones del embalse, figura 1.ª (margen derecha), se coloca la cámara y luego la tubería forzada y casa de máquinas con la profundidad precisa, y se evacúa el agua como en el caso anterior. En el segundo y tercer caso, según se ha dicho, la central se puede instalar en el punto que se crea más conveniente de la galería subterránea.

**SALTOS EN CADENA.** (FIGURA 6.ª)—El mejor rendimiento de la energía de un río se obtendría dividiendo el curso de éste en zonas de longitudes iguales a las distancias que separan los puntos donde desembocan sus afluentes principales, utilizando en cada zona el embalse e instalando uno o varios saltos, colocados sin solución de continuidad, en cadena, de modo que el canal de desagüe de uno sea el de llegada del inmediato inferior, de modo que se pueda, a voluntad, mediante compuertas, verter el agua de cada salto en el cauce del río. Los saltos inferiores pueden disponer de mayor caudal si se cortan y captan corrientes subálveas.

**CONSIDERACIONES ACERCA DE LAS DISTINTAS CLASES DE SALTOS.**—Cuando son practicables ambos procedimientos (saltos subterráneos y superficiales), debe hacerse un estudio sobre el coste del Kw. en cada uno de ellos, conjugando, para llegar a una decisión acertada, los diversos elementos que los integran. Conviene sopesar con detenimiento todos estos factores; no cabe desechar o admitir una u otra solución atendiendo sólo al coste por m. l. del canal en túnel o descubierto.

La objeción que parece oponerse a los saltos de la segunda y tercera clase es la de su coste, que se cree elevado, comparado con los de la primera. Tal vez sea exagerada esta apreciación hecha *grosso modo*. Téngase en cuenta que, entre los mismos extremos A y B de la concesión (figura 1.ª) el canal de desagüe subterráneo viene a substituir al de llegada descubierto o en túnel; que aquél es más corto que el descubierto que se plegara a las sinuosidades del terreno, ya que el primero va en línea recta desde la casa de máquinas hasta su unión con el río, de modo que aun cuando el coste por unidad sea mayor en el subterráneo, el número de aquéllas es bastante menor; que en el canal descubierto es necesario expropiar los terrenos que ocupe y realizar obras muy caras, como acueductos, sifones, túneles, etc., y a veces cubrir el canal; que el procedimiento de centrales subterráneas permite



construir saltos de gran altura y potencia en muchos casos en que antes no era posible, y cuyo coste de explotación por Kw., para el mismo caudal, ha de ser menor que en los saltos pequeños.

En los subterráneos y en los superficiales hay partidas comunes, como son la presa, canal de llegada (en los mixtos), maquinaria, tubería forzada y cuadro de distribución, que son las partidas más fuertes del presupuesto, y difiere sólo el coste de la casa de máquinas, según sea subterránea o superficial, y el canal de desagüe que en todo su recorrido reemplaza al de llegada de un salto entre los mismos puntos del río. Con el procedimiento de centrales subterráneas, se pueden instalar en los centros de población y factorías importantes por los que pasen ríos, saltos que, por estar situados en los lugares de consumo, suprimen o reducen las líneas de transporte, siempre costosas y sujetas a averías que causan interrupciones en los servicios dependientes de ellas, además de minar considerablemente la potencia. También es posible aprovechar la energía de los ríos en países llanos. No se olvide que en los saltos de montaña hay que hacer casi siempre, para el transporte de materiales, obras muy costosas, y que este mismo transporte es caro. Estos capítulos son nulos, con frecuencia, en los saltos situados en terrenos de fácil acceso. Por otra parte, la potencia destructora de las guerras modernas requiere la defensa de las industrias básicas contra los bombardeos aéreos. Aquéllas sólo encontrarán refugio, relativamente seguro (no nos atrevemos a decir completamente), en el seno de la Tierra, lejos de la superficie.

### RECAPITULACIÓN

Cara o barata la energía procedente de los saltos subterráneos, habrá que recurrir a ella. En el primer

caso, como en las minas, donde después de desflorar los filones ricos, o agotarlos, se explotan los pobres. *Nada más costoso que las actuales restricciones, que paralizan la vida del país.*

Las ventajas de los saltos subterráneos se pueden resumir en las siguientes:

- 1.<sup>a</sup> Facilidad de construir saltos de gran altura y potencia en muchos casos en que no son factibles los superficiales;
  - 2.<sup>a</sup> Posibilidad de instalarlos en países llanos y en centros de consumo, economizando la conducción a distancia y las averías y pérdidas por este concepto;
  - 3.<sup>a</sup> Aumentar la altura útil del salto entre los mismos puntos, pues el canal rectilíneo necesita, para el mismo gasto, menos pendiente, y es más corto que el que se adapte a los accidentes topográficos de una ladera;
  - 4.<sup>a</sup> Permitir comunicar dos cuencas entre sí, lagos con cuencas y éstas con el mar, por saltos en línea recta, evitando largas sinuosidades o rodeos;
  - 5.<sup>a</sup> Cumplir la necesidad de proteger las instalaciones hidroeléctricas, en lo posible, contra los bombardeos aéreos, y
  - 6.<sup>a</sup> Proporcionar un mejor aprovechamiento de la energía de los ríos. Esto es lo esencial, más racional, más próximo al integral, que el de los superficiales.
- Y nada más, queridos compañeros. Pido la mayor benevolencia para estas lucubraciones, que creo cuajarán algún día en realidades. Por lo menos, ved en ellas el noble deseo de aportar un grano de arena que contribuya a que no se retrase la marcha de la vida española, en relación con la de otros países.

La Felguera, marzo de 1950.

---

*Al terminar el Sr. Secretario de dar lectura del resumen del trabajo transcrito, varios Sres. Congressistas hacen diversas observaciones sobre el mismo. También da cuenta el Sr. Secretario del siguiente estudio núm. 195.*



## N.º 195. - Soluciones para el aprovechamiento industrial de la energía de las olas

Autor: D. RAMÓN JIMENO CERNUDA

Ingeniero Industrial

### INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de la energía de las olas del mar pertenece al número de los problemas industriales que, hasta hace poco, se rechazaban por impracticables.

Este juicio, tan universalmente admitido, nos ha contenido, hasta hoy, cuantas veces hemos querido dar a luz algunas ideas que hace bastantes años venimos acariciando, y que, a pesar de todo, creemos envuelven una solución para el problema enunciado.

Quisiéramos limitar nuestro trabajo a una descripción somera de la cuestión; pero se trata de una materia tan nueva, hasta para los hombres estudiosos, que, aun reconociendo nuestra incompetencia para tratar los múltiples asuntos relacionados con la energía de las olas, creemos de absoluta necesidad dar a conocer, previamente, las bases principales de tan importante cuestión.

### PRIMERA PARTE

#### ESTUDIOS PRELIMINARES

##### I. OLAS

*Teoría de las olas.*—La agitación que se produce en el mar y en toda masa líquida, bajo la influencia de la presión del viento, forma una serie de crestas y depresiones en la superficie líquida, a las que llamamos olas oscilantes.

No hay en estas olas traslación de masas, sino simplemente transmisión de movimiento ondulatorio, como el que se verifica en un campo de trigo agitado por el viento.

M. Flachet, resumiendo los trabajos de los que antes que él habían tratado esta cuestión, decía: «La causa del movimiento ondulatorio parece sencilla: todo cuerpo sensiblemente incomprensible, comprimido en-



tre varias superficies, relativamente en reposo, se escapa por el lado en que encuentra la menor resistencia.»

Se eleva el agua verticalmente, porque esta dirección del movimiento es la resultante de las presiones a que está sometida. Una vez elevada, transmite la presión, debida a su altura, a las moléculas que la rodean, y éstas, recibiendo dicha acción y la reacción de la resistencia opuesta por el agua en reposo, se elevan a su vez, mientras las primeras descienden con la velocidad que los cuerpos graves adquieren al caer. Así se propaga el movimiento ondulatorio, y esta propagación es incesantemente la causa y el efecto del movimiento vertical de las moléculas del fluido. La causa que ha producido la ondulación es una presión; esta presión ha producido un desplazamiento próximo e inmediato que no puede menos de propagarse en igual forma.

Se puede medir el volumen del agua que se mueve, la velocidad de ese movimiento, y determinar la cantidad de trabajo que representa; se puede también medir la altura de la ondulación, la velocidad de su movimiento vertical, la de su propagación, su extensión, etc., y se puede, finalmente, hallar la resistencia que la misma agua opone a su movimiento por los frotamientos entre sus moléculas, y el esfuerzo necesario para desalojar el aire que descansa sobre la superficie líquida; pero a nosotros, lo que primero y lo que principalmente nos interesa, es conocer la dirección del movimiento molecular. Si el movimiento ondulatorio fuera una traslación horizontal de todas las moléculas según la dirección de la ondulación, la navegación sería imposible; luego el movimiento de traslación horizontal no existe. Mas, ¿es por esto absolutamente vertical; o bien es orbitario, elíptico, circular, etc.?

Newton, que fué el primero que estudió las leyes de propagación del movimiento en los fluidos, adoptó el movimiento molecular vertical y comparó las ondas acuosas a las oscilaciones del agua en un sifón invertido.

Bremontier, en sus investigaciones acerca del movimiento de las olas, admite, como un hecho demostrado por sus propios experimentos, que las moléculas del agua no están sujetas, durante la ondulación, más que al sólo movimiento de oscilación vertical, por lo menos, hasta una gran profundidad.

El Ingeniero Virla apoya y defiende esta teoría

contra las opiniones de Emy, y dice: «Las observaciones de Bremontier prueban, en efecto, que, cuando los movimientos de las moléculas son verticales, el líquido no ejerce más que un simple frotamiento sobre las superficies que se presentan paralelamente a la dirección de su movimiento, mientras que, a una profundidad más grande, los efectos destructores y de arrastre se dejan sentir como resultado de otro movimiento, cambio de dirección, que no puede ser vertical».

»El coronel Emy, fué el primero que admitió que cada molécula, independiente de su movimiento vertical de ascenso y descenso, está también dotada de un movimiento horizontal que acerca o separa unas moléculas de otras, según que ellas estén por encima o por debajo de su nivel natural. De la combinación de estos dos movimientos, que van disminuyendo de amplitud desde la superficie hasta el límite de la agitación, Emy deduce un movimiento único en línea curva, según el cual, cada molécula describe, durante su doble oscilación, una órbita cerrada, que es una elipse, cuyo eje mayor es vertical».

Esto mismo afirman Airi Cornaglia y otros autores; mientras que Bertin, Weber, Scot-Russell y Flament, afirman que, estas órbitas cerradas, son circunferencias que disminuyen en progresión geométrica y cuyos diámetros están representados por:

$$-\frac{y}{be^a}$$

siendo  $b$  el diámetro del círculo descrito por las moléculas de la superficie;  $a$  el radio del círculo que engendra la trocoide (perfil exterior de la ola), e  $y$  la profundidad a que se supone situada la molécula.

Bertin, que dedujo, por consideraciones teóricas, la forma circular para las órbitas que describen las moléculas, hace notar que la influencia del fondo las modifica, convirtiéndolas en elipses; y en los ensayos practicados en compañía de Caligni encontró, como Airi, Bousines y otros autores, que los círculos de la superficie variaban progresivamente hasta convertirse en líneas rectas en el fondo.

Según Aimé, que ha hecho muchos experimentos, el movimiento de las moléculas es oscilante en un plano perpendicular a la ola; aquéllas marchan al encuentro de las que llegan, y en cuanto entran en el plano vertical correspondiente a la cresta, retrogradan para avanzar en el sentido de su marcha aparente; después,



el movimiento de la molécula se va retrasando y cambia de signo para marchar al encuentro de otra ola. La amplitud de esta oscilación, dice Aimé, suele llegar a un metro, aunque, ordinariamente, sea menor, y varía poco de la superficie al fondo, cuando la agitación cerca de éste es muy fuerte. Termina diciendo que las curvas descritas por las moléculas son elipses del mismo eje horizontal, y cuyo eje vertical decrece con la profundidad.

De las anteriores conclusiones, dice Pérez de la Sala, se deduciría que el movimiento de la molécula es nulo en la parte más alta y en la más baja de la onda, lo cual no es compatible con la forma elíptica supuesta por Aimé. Tessan afirma también, que en dichos puntos no varía el azimut de los cuerpos flotantes. Estos resultados necesitan confirmación, pues darían para las órbitas curvas muy diferentes de las observadas. Por último, Caligny sostiene que una parte de las moléculas, situadas en la misma vertical, se mueve en un sentido, mientras el resto de ellas lo verifica en el opuesto.

El estado actual de la teoría se formula en las cuatro leyes de Franz von Gerstner:

1.<sup>a</sup> Las moléculas que tienen su centro de oscilación en una misma línea horizontal, presentan en cada instante la forma de una trocoide que tiene por límite la cicloide, al ser ola de traslación que rompe, o de otro modo, una curva de nivel de la ola está engendrada por un punto móvil, que recorre con velocidad angular constante una circunferencia animada de un movimiento de traslación horizontal de velocidad constante.

2.<sup>a</sup> Dos curvas de nivel de la misma longitud y que tengan sus extremos en unas mismas verticales y recorridas simultáneamente por moléculas de una misma masa, necesariamente debe existir entre sus dimensiones y su separación las relaciones determinadas por la invariabilidad de volumen de los elementos de la masa. Los ángulos descritos, pues, por todas las moléculas situadas en una misma vertical serán iguales y ocuparán las mismas posiciones angulares sobre sus órbitas.

3.<sup>a</sup> Teniendo en cuenta la invariabilidad de volumen, el radio de las órbitas decrece en progresión geométrica cuando la profundidad decrece en progresión aritmética.

4.<sup>a</sup> El producto de la celeridad por la velocidad an-

gular es constante, o sea que aquéllas son inversamente proporcionales.

Sería, en fin, cuestión interminable seguir las disquisiciones acerca de las teorías con que los diversos autores explican los movimientos moleculares; enunciadas quedan las principales, de las cuales nosotros podemos deducir que, las afirmaciones sentadas por Newton, los ingenieros Bremontier y Virla y otros sabios experimentadores, de que no veían en las moléculas otro movimiento que el vertical, si bien puede no probar que sus aseveraciones sean exactas, prueba, evidentemente, que en la práctica podemos prescindir de tener en cuenta esas pequeñas oscilaciones horizontales tan discutidas; y nos afirma más en esto, el hecho, por todos comprobado, de que la acción de las olas sobre las superficies fijas verticales situadas cerca de la superficie líquida se verifica como si los movimientos de las moléculas líquidas fuesen oscilatorios verticales, resultando en esta dirección el esfuerzo mayor que puede producir el movimiento ondulatorio.

#### *Causas que favorecen el movimiento de las olas.—*

La inclinación con que actúa el viento sobre la superficie de la Tierra, que muchos autores evalúan en 18°, es lo que da a éste su principal fuerza de acción sobre la masa líquida; pero para que la ola se propague, se prolongue y crezca en elevación, es necesario: 1.º, facilidad para que el viento obre sobre la superficie longitudinal y transversalmente; 2.º, gran profundidad y regularidad en el fondo del mar, y 3.º, gran extensión superficial para que la acción del viento continúe sobre las olas durante largo recorrido.

*Máxima altura de las olas.*—La altura de las olas no sigue creciendo indefinidamente, aun cuando encuentren en su marcha todas las facilidades enumeradas para su propagación.

Son muchos los marinos que han medido olas de 9 a 13 metros en el Océano. Scoresby es quien ha medido olas de mayor altura, cuyas dimensiones sean más dignas de fe: las que observó este marino en el Atlántico no exceden de 15 metros. Midió en un temporal en el Atlántico, que más de la mitad de las olas excedían, con mucho, de 9 metros de elevación, y un gran número (una de cada seis) pasaban de 13,50 metros.

Otros muchos marinos hablan de haber observado olas más o menos gigantescas, pero fácil es comprender el poco crédito que merecen esas observaciones; he-



chas en un medio de acción en el que ningún punto fijo tienen para relacionar sus visuales; y en ocasión en que el estado de ánimo del observador carece de la tranquilidad que tales mediciones exigen.

Arago y Arnott, entre otros, no dan crédito a esas alturas portentosas y las reducen a las modestas de 6 y 7 metros, para los temporales ordinarios, y algo más para los extraordinarios.

En el Mediterráneo, la altura de las olas es menor: el conde Marsilly las encontró de 4,50 metros con una línea de agua de 100 Km., y H. Smith las evalúa en 4,50 a 5,50 en los temporales, si bien asegura haberlas medido en el golfo del León hasta de 9 metros.

Tomás Stevenson, establece una fórmula empírica para líneas de agua que no excedan de 170 Km., y deduce de sus observaciones que las alturas de las olas son proporcionales a la raíz cuadrada de la línea de agua, es decir, que la altura  $h$  de la ola, en metros, es:

$$h = 0,25 \sqrt{D}$$

Haciendo aplicación, cuando  $D = 170$  Km., tendremos:

$$h = 0,25 \sqrt{170} = 0,25 \times 13 = 3,25 \text{ m.}$$

M. Antoine ha deducido de las observaciones que ha reunido, en número de 10.000 hechas por diferentes marinos, una relación entre las fuerzas del viento y la altura de las olas, expresada por la siguiente fórmula:

$$(2H)^3 = 0,75 V^3; \text{ o bien, } 2H = \sqrt[3]{0,75 V^3}$$

representando  $V$  la velocidad del viento en metros por s., y  $2H$  la altura de la ola. Se prescinde en esta fórmula de un importante elemento, la línea de agua; si bien, la intensidad del viento lleva casi siempre consigo la influencia de aquél. Aplicada la fórmula a varios casos resulta:

para viento suave:	$V = 4 \text{ m/s.};$	y	$2H = 2,39 \text{ m.}$
» » fresco:	$V = 9 \text{ »}$	y	$2H = 3,92 \text{ »}$
» » fuerte:	$V = 16 \text{ »}$	y	$2H = 5,77 \text{ »}$
» gran huracán:	$V = 50 \text{ »}$	y	$2H = 12,50 \text{ »}$

Pérez de la Sala, de cuya obra «Construcciones en el mar» hemos tomado algunos de estos datos, dice que no se pecará de corto tomando 7 metros como límite superior en los puertos del Océano; 3,50, en el Mediterráneo, y de 2,50, en el lago de Ginebra.

*Profundidad del movimiento de las olas.*—Como re-

sultado de varios experimentos, Aimé ha venido a parar a las conclusiones siguientes: en una mar medianamente agitada, es decir, cuando las olas cuentan, desde el fondo hasta la cresta, 1,30 a 1,80 metros, el movimiento de las moléculas es muy apreciable a la profundidad de 12 a 15 metros; y con mares gruesas, la agitación no deja de ser sensible hasta la profundidad de 40 metros.

De un autor tomamos el siguiente párrafo: «Hasta hace poco se creía que a los 10 metros de profundidad cesaba la agitación de las aguas, pero La Biche asegura que hasta los 188 metros ha encontrado señales evidentes del efecto del oleaje, y Weber afirma que estos efectos se hacen sentir hasta 136 veces la altura de la ola. De todos modos, estas acciones disminuyen, muchísimo con la profundidad, aunque hasta los 200 metros se comunica la remoción del agua producida por el paso de los ciclones.»

*Forma de la ola.*—Los surcos y las lomas que forman las olas en alta mar se reproducen y se siguen unos a otros, con igual intensidad y altura, formando líneas contiguas, rectas y perpendiculares a la acción del viento.

Se modifican las olas, cuando la fuerza del viento sufre algún cambio o cuando los bajos o las costas interrumpen la libre transmisión del movimiento oscilatorio.

Se llama amplitud, o ancho de la ola, a la distancia comprendida entre dos depresiones o dos crestas consecutivas.

El perfil de una ola adopta la forma de un trocoide o sea una cicloide alargada. La amplitud es, por lo menos, cuatro veces mayor que la altura, sin que por esto se conozca relación alguna constante entre dichas dos dimensiones. La amplitud mayor observada en el Atlántico por Scoresby es de 210 metros.

Rankine deduce que la altura sobre el nivel medio, excede a su depresión de la siguiente manera.

$$\begin{array}{l} \text{Encima } \frac{H}{2} + 0,7854 \frac{H^2}{L} \\ \text{Debajo } \frac{H}{2} - 0,7854 \frac{H^2}{L} \end{array}$$

*Modificaciones de las olas por el viento.*—Cuando el viento que produce el oleaje cambia de intensidad o de dirección, las olas modifican sus dimensiones en más o menos según sea el nuevo viento con relación al que produjo la agitación.



Cuando el oleaje viene de lejos, como efecto o prolongación de un temporal remoto, sin que se vea relación inmediata entre el viento reinante y las condiciones de las olas que se observan, dicen los marinos que hay «mar de fondo»; significando así, que la transmisión de ese movimiento oscilatorio no se verifica por la mediación de fuerzas exteriores.

El viento fuerte ejerce a veces su acción sobre las crestas de las olas, elevándolas irregularmente, rompiéndolas y produciendo penachos de espuma con movimiento de traslación, que dan al mar un aspecto imponente, y hacen peligrosa la navegación, ya de suyo difícil, cuando, como se dice vulgarmente, se ha de andar contra viento y marea.

Estas erosiones, estas acciones directas del viento sobre las crestas de las olas, se dominan y se evitan por completo por medio de cuerpos flotantes, o de cualquier obstáculo insignificante que evite el contacto directo del viento con el agua. En efecto: basta una sencilla red flotante o unas gotas de grasa esparcidas sobre el agua para que la mar adquiera el aspecto de mar de fondo, con olas redondeadas y regulares. El almirante Bourgois, tratando de la acción de los cuerpos grasos sobre las olas, considera que su influencia se limita a impedir que la ola descabece, esto es, que su cresta rompa; «resultado importante», dice, «pues la mar de superficie no es peligrosa para el buque, al paso que es en extremo temible el que la ola descabece o principie a romper».

*Modificaciones de las olas por los obstáculos.*—Si la altura de agua disminuye, la ondulación acorta su amplitud y la altura de la onda aumenta, para que el volumen de la misma quede invariable. Lo mismo sucede si la ola se mete en un estrecho o canal: las olas se retrasan, acortan su amplitud y aumentan su altura.

Cuando las olas pasan bruscamente de una sección estrecha a otra más ancha, sufren una modificación que Scott Russell llama «difusión». Al desembocar en el canal más ancho, la onda se esparce según un arco de círculo en el cual disminuye rápidamente la altura hasta ser insensible a los 90°, y de sólo la mitad y la tercera parte, respectivamente, a los 30° y 60°. A la difusión de las ondas debe atribuirse el rápido decrecimiento de la agitación al abrigo de las puntas, cabos y diques.

Este fenómeno prueba, evidentemente, que la ola

se propaga también en el sentido transversal de su movimiento, prolongando sus crestas siempre que puede, aún a pesar de las grandes resistencias que le oponen la gran masa de agua en quietud y el choque con los bajos fondos, resistencias que producen la curva y decrecimiento en la cresta de la ola.

Si, en alta mar, en un punto cualquiera, aprovechando la energía de una ola oscilante, la debilitamos o anulamos, la ola se reconstituirá en seguida por la transmisión de las presiones laterales; la pérdida de energía se distribuirá a lo largo de la ola, y resultando insignificante para el conjunto de ésta, y no habiendo obstáculos que se opongan a su transmisión lateral, la ola seguirá su marcha en la misma dirección, recta y sin debilidad aparente.

La propia ley que obliga al agua tranquila a llenar cualquier hueco que en la misma masa se produzca, existe en la mar agitada para que las olas se reponga en el acto de cualquier deformación parcial. Si esta tendencia no existiera, las ondas grandes ni pequeñas no tomarían su forma alargada, sino que conservarían la forma inicial que les dió el viento, arrugando muy irregularmente la superficie marina.

Si imaginamos un diafragma o tabique rígido suspendido verticalmente de modo que penetre algo bajo la superficie líquida, las olas se transmitirán por debajo del mismo y pasarán de un lado a otro como si el tabique no existiera, pero a medida que el mismo penetre más en el agua, la transmisión del movimiento oscilante se debilitará y llegará a anularse, cuando el calado de aquél llegue a mayor profundidad de la que alcance el movimiento ondulatorio. Esto es importante para nuestro estudio.

Cuando la ola oscilante encuentra a un paramento vertical cuya base está profunda, se refleja sin romper y sin producir efecto alguno destructor; mas si la base está a tal profundidad que pueden en ocasiones romper en ella las olas, entonces los efectos destructores se manifiestan del modo más imponente, desarrollándose esfuerzos titánicos.

*Olas de traslación y rompientes.*—Las olas oscilantes no pueden subsistir cuando el calado no es mayor que su altura, según unos, o doble de su altura, según otros.

Para las olas en las costas no se debe suponer (dice Pérez de la Sala), como en alta mar, poco extensos



los movimientos de las moléculas, comparados con la magnitud de las olas. A medida que la profundidad decrece, los movimientos de las moléculas aumentan la amplitud de su excursión: cuando la ola avanza sobre un plano inclinado, como el que forma la playa, la teoría indica que no se mantiene la ondulación sin una fuerza que actúe en sentido opuesto a su marcha; y al faltar esa fuerza, la ola no puede conservar el estado ondulatorio: la parte anterior toma una inclinación cada vez mayor, la posterior se tiende más y más, y llega un momento en que, al romperse el equilibrio, las moléculas toman un movimiento de traslación y la masa de agua se desploma, envolviendo en su caída el aire, con el cual forma la espuma en que se deshace la ola; entonces se dice que la ola rompe.

Los marinos y los ingenieros declaran unánimes que sólo en semejante estado de rompiente, es temible la ola para las embarcaciones y para las obras; en efecto, dice Pérez de la Sala: «mientras la ola es una ondulación, el buque puede ser trabajado o sacudido, sus oscilaciones más o menos violentas, pero no hay peligro inminente que temer; al paso que, si la ola toma un movimiento de traslación, será el buque arrastrado por ella y lanzado y destrozado contra la costa».

*Factores de la energía de las olas.*—Se llama período al tiempo que media entre el paso consecutivo, por el mismo punto, de dos crestas; y fase, al estado en que la ola se encuentra en un punto y momento dados.

La velocidad de las olas, que llamaremos  $V$ , estará medida por la relación de la amplitud que representaremos por  $2L$ , al período que llamaremos  $2T$ ; verificándose las relaciones siguientes:

$$V = \frac{2L}{2T} = \frac{L}{T}; \quad L = TV, \quad \text{y} \quad T = \frac{L}{V}$$

Observemos que estos tres valores tan relacionados entre sí, son completamente independientes de la altura de las olas.

Antoine deduce, de sus observaciones, la siguiente relación entre la velocidad de las olas y la del viento:

$$V = 6,9 \sqrt[4]{v}$$

Haciendo algunas aplicaciones de esta fórmula deducimos:

para el viento $v = 4$ m/s.	$V = 9,60$ m/s.	para las olas
» » $v = 9$ »	$V = 11,70$ »	» » »
» » $v = 16$ »	$V = 13,80$ »	» » »
» » $v = 50$ »	$V = 18,30$ »	» » »

El mayor esfuerzo de las olas oscilantes lo verifican, como dijimos, en el sentido vertical: en ello están conformes todas las teorías, todos los experimentos y todos los autores. La teoría indica para grandes profundidades (según Pérez de la Sala) un esfuerzo equivalente a una carga estática representada por una ola de doble altura: es decir, que en un metro de superficie, una ola de dos metros de altura dará un esfuerzo de  $2.000 \times 2 = 4.000$  Kg., que multiplicado por el recorrido de la ola 2 ms. nos dará para el trabajo:

$$\text{Trabajo} = 4.000 \times 2 = 8.000 \text{ Kg./m.}$$

Prescindiremos siempre, para simplificar, de la mayor densidad del agua salada.

Si representamos por  $V_1$  la velocidad vertical de la ola y por  $2H$  la altura de ésta, tendremos

$$V_1 = \frac{2H}{2T}; \quad \text{y la fuerza viva de la ola en el sentido}$$

vertical será proporcional a  $(2H \times 2L) V_1^2$  que substituyendo nos da:

$$(2H \times 2L) \left( \frac{2H}{2T} \right)^2 = (2H)^3 \times \frac{2L}{2T^3}$$

Lo que nos dice que, la fuerza viva de la ola en el sentido vertical, es proporcional al cubo de su altura; y como, según vimos en la relación de Antoine, este cubo de la altura es proporcional al cuadrado de la velocidad del viento, equivale a decir que la fuerza viva de la ola, en el sentido vertical, es proporcional a la fuerza del viento; relación que ya en 1866 había propuesto M. Coupvent-des-Bois.

Las deducciones teóricas de M. Flamant, en su tratado de Hidráulica, le llevan a la siguiente conclusión: la energía de la ola es igual (o un poco inferior) a la masa líquida contenida en el círculo de oscilación de las moléculas superficiales (en la altura de la ola) multiplicada por el cuadrado de la velocidad aparente de la propagación.

Aplicando las diferentes fórmulas que hemos enunciado en este capítulo, deducimos el siguiente estado numérico, en el que se especifican las que han servido para el cálculo y los autores de las mismas.



Dimensiones					En un metro cuadrado de superficie de mar				
Velocidad del viento	Altura de las olas	Celeridad de transmisión de las olas	Período de las olas	Amplitud de las olas	Esfuerzo vertical de la ola	Trabajo del esfuerzo vertical	Trabajo en función de la celeridad	Trabajo teórico por segundo y por m².	
metros por 1 s.	Antoine $2 H = \sqrt[3]{0,75 V^2}$ m.	Antoine $V = 6,9 \sqrt[4]{V}$ m/s.	Observado $2 T = \frac{2 L}{V}$ s.	Deducida $2 L = 2 TV$ m.	P. de la Sala $2 H \times 2 \times P$ Kg.	P. de la Sala $2 H \times 2 H \times 2 \times P$ Kg./m.	Flamant $\frac{1}{2} \frac{P}{9} V^2$ Kg.	$\frac{1}{2} m V^2$ 2 T Kg./m.	Caballos de 75 Kg./m.
	4	2,40	9,60	6	58	4.800	11.520	11.270	1.878
	9	3,90	11,70	7	82	7.800	30.420	27.243	3.892
	16	5,80	13,80	8	110	11.600	67.280	56.240	7.030

Como se ve, no resultan iguales los trabajos calculados en función de la altura de la ola, o en función de la celeridad de su transmisión; pero se acercan bastante, para poder apreciar que, esta desigualdad, es principalmente debida a la fórmula de Antoine que deduce el valor de V, no puede dárnoslo con exactitud, sino de un modo aproximado, pues lo deduce prescindiendo de la línea de agua y en función de la velocidad del viento, que, como sabemos, es completamente inconstante.

Teniendo en cuenta las alturas de las olas y los períodos, vamos a calcular el valor del trabajo que las mismas representan por segundo, en cada metro cuadrado de superficie de mar, y el valor práctico de dicho trabajo obtenido éste de experimentos propios practicados con uno de nuestros elementos y en malas condiciones; tan sólo 1/4 del teórico, deduciendo el siguiente estado, en el que se detallan los resultados para olas comprendidas entre 0,20 y 4,00 metros.

Trabajo de las olas por m²

Olas oscilantes		TRABAJO			Olas oscilantes		TRABAJO		
Alturas	Períodos	Teórico		Práctico (1/4 del teórico) Por segundo	Alturas	Períodos	Teórico		Práctico (1/4 del teórico) Por segundo
		Por ola	Por segundo				Por ola	Por segundo	
metros	segundos	Kg/m.	Kg/m.	Kg/m.	metros	segundos	Kg/m.	Kg/m.	Kg/m.
0,20	4	80	20	5	2,20	6	9.240	1.540	385
0,40	4	320	80	20	2,40	6	11.520	1.920	480
0,50	4	500	125	31	2,50	6	12.500	2.083	520
0,60	4	720	180	45	2,60	6	13.520	2.263	565
0,80	4	1.280	320	80	2,80	6	15.680	2.613	653
1,00	5	2.000	400	100	3,00	6	18.000	3.000	750
1,20	5	2.820	564	141	3,20	6	19.280	3.213	803
1,40	5	3.980	798	199	3,40	6	20.720	3.453	863
1,50	5	4.500	900	225	3,50	7	24.500	3.500	875
1,60	5	5.120	1.024	256	3,60	7	25.920	3.703	925
1,80	5	6.480	1.296	324	3,80	7	28.880	4.126	1.031
2,00	6	8.000	1.300	325	4,00	8	32.000	4.571	1.142



## Estadística del oleaje durante un año en Barcelona

MESES	Número de días en que hubo olas de metros			
	0	0,50	1,00	2,00
Enero.....	12	3	10	6
Febrero.....	8	5	11	4
Marzo.....	10	2	9	10
Abril.....	10	4	9	7
Mayo.....	14	2	14	1
Junio.....	10	5	12	3
Julio.....	11	10	9	1
Agosto.....	8	4	15	4
Septiembre.....	12	4	10	4
Octubre.....	17	2	8	4
Noviembre.....	11	2	13	4
Diciembre.....	9	6	8	8
TOTALES.....	132	49	128	56

Estos datos están tomados de los partes diarios del vigía publicados en el diario.

Los 0 indican los días que no hay parte o que dice «mar llana», en cuyos días suponemos la ola = 0.

Los 1 indican los días en que el parte dice «marejadita», y en los cuales la ola la suponemos de 0,50 m. altura.

Los núm. 2 = «marejada»; altura media = 1,00 m.

Los núm. 3 = «marejada gruesa»; ídem ídem = 2,00 m.

Algunas anomalías que se notan en estos datos, como los muchos días de mar llana en el mes de octubre, indican su deficiencia, pero a falta de otros, nos dan ellos alguna luz.

De los anteriores estados vamos a deducir el promedio anual del trabajo del oleaje en 1 m<sup>2</sup>. Resultan en un año:

### Trabajo medio:

56	días de ola de 2,00	a	325 Kg/m.	=	18.200
128	»	»	1,00 a 100	»	= 12.800
49	»	»	0,50 a 31	»	= 1.519
132	»	»	0,00 a 0	»	= 0
365		Suma	»		32.519

Dividiendo estas dos sumas, tendremos:

$$\frac{32.519}{365} = 1,2 \text{ caballos de } 75 \text{ Kg/m.}$$

que es el trabajo medio y real que por 1 m<sup>2</sup> y por segundo representa el oleaje en Barcelona.

Los datos que nos han servido para llegar a esta cifra han sido prudentemente rebajados, así es que no puede tacharse de exagerada; pero ¿será aprovechable toda esta energía de las olas? De eso trataremos en el capítulo correspondiente.

## II.—FUERZAS NATURALES

*Necesidad de fuerza.*—No arredra ya a la mecánica industrial, la dureza ni la tenuidad de las primeras materias que ha de transformar, ni la diversidad ni el número de las modificaciones a que las ha de someter, ni la rapidez y precisión que se le exija.

Si algún límite tiene esa acción poderosa que forma el orgullo de la moderna industria, no está ya, ciertamente, en los efectos, sino en la raíz, en la limitación de la fuerza puesta en actividad.

No basta que las máquinas venzan resistencias insuperables para el hombre y substituyan, en muchos casos con ventaja, la agilidad y habilidad de nuestras manos; sino que es necesario que, en todas partes, reemplacen por completo nuestros trabajos corporales.

«Fuerza, fuerza», dice Benot. Este es hoy el grito de la Humanidad. La riqueza de una nación depende del incesante incremento de la fuerza motriz.

«Y bien: La fuerza abunda.»

«Pero el hombre no quiere pedirla, con preferencia, más que a la combustión del carbón escondido en las entrañas de la tierra.»

«Y esto es, a sabiendas, despilfarro.»

«¿Y el mar? ¿Y los vientos? ¿Y el calor interno del planeta?... Donde quiera que haya una fuerza latente todavía, debe inmediatamente aprovecharse; más que por lo que ella puede valer en sí, por la multitud de industrias beneficiosas que el nuevo aprovechamiento ha de traer consigo, en virtud de una ley admirable e ineludible de la mecánica económico-social.»

Tisandier, después de muchas consideraciones acerca del fin próximo de la hulla, decía:

«¿Quién ha dicho que la máquina de vapor es la última palabra de la ciencia y que nunca vendrán a sustituirla otros motores? ¡Pues qué! ¿No lanza el



sol a torrentes, rayos caloríficos capaces de mover los émbolos de las máquinas del porvenir? ¿No se halla el mar en nuestras costas sometido al movimiento de las mareas? ¿La oscilación sucesiva de sus ondas, no es una fuerza de prodigio constante y regular que el hombre fácilmente puede poner a su disposición? Si es cierto que un fuego central perpetuo arde bajo la epidermis de nuestro globo, ¿no puede ese profundo fuego llegar un día a convertirse en el único hogar de todos nuestros mecanismos? ¿No está el aire en perpetuo movimiento? Y los vientos, ¿no son una potente fuerza motriz, siempre dispuesta al trabajo, como un resorte en tensión?»

«Y bien, si hoy un entendimiento perspicaz pusiese a nuestra vista las invenciones que llevarán a cabo nuestros descendientes, cuando la hulla les falte, sonreiríamos compasivamente al escuchar la rica enumeración de las nuevas maravillas.

«Y sin duda agregaríamos —es imposible la realización de prodigios semejantes—: que siempre habrá sabios, como Arago cuando negaba los caminos de hierro, e imprudentes como Napoleón I, cuando negaba los barcos de vapor.»

Notable es cuanto dice Tisandier en los anteriores párrafos, en los que bosqueja el inmenso horizonte que se presenta a la utilización de los diversos manantiales de fuerza que nos ofrece la Naturaleza. Parecidas disertaciones se podrían establecer sobre las limitaciones de los combustibles líquidos.

Pero si son tantas y de tan variada índole las manifestaciones en que se nos presenta la energía activa, se ocurre preguntar: ¿Cuál será de todas las más abundante? ¿Cuál será la más asequible para la industria?

La contestación a las anteriores preguntas implicaría la posesión de la Suprema ciencia, con el conocimiento de cuanto, en el transcurso del tiempo, el hombre ha de descubrir y ejecutar; pero sí podemos, dentro del terreno que se indica, establecer comparaciones hasta donde nos permitan las apreciaciones que están a nuestro alcance.

Según esto, la cuestión estriba en conocer la relación de importancia con que debemos apreciar estas fuerzas, no ya desde el punto de vista de su origen ni de su cantidad absoluta, sino desde su aspecto práctico, es decir, en proporción con los medios de que, hoy

por hoy, dispone la industria para el aprovechamiento de cada una de ellas.

Para esto clasificaremos los manantiales de energía, prescindiendo de la energía atómica, en dos grupos: caloríficos y mecánicos. De los primeros estudiaremos: 1.º, el calorífico, producido por las reacciones químicas; 2.º, el que nos transmite la radiación solar, y 3.º, el que procede del interior de nuestro Planeta. Después de esto, trataremos de la energía mecánica, que nos ofrecen: 1.º, el viento; 2.º, los saltos de agua; 3.º, las mareas, y 4.º, las olas.

#### MANANTIALES DE ENERGÍA CALORÍFICA.

*Reacciones químicas.*—La energía química, o afinidad, es el origen de todas las otras formas de energía, mas sólo debemos ocuparnos de un grupo de las reacciones exotérmicas, como es el de las combinaciones de los cuerpos combustibles con el oxígeno; y, concretando más, de la combustión de la hulla, que al ser la más empleada en la industria, prueba que es la más económica y práctica.

Mientras no ha habido otra manera de obtener el trabajo mecánico que por medio de la combustión, el sistema, por ser único, era el mejor; mas hoy día, que en virtud de los progresos de las ciencias industriales vemos la posibilidad de conseguir, por medios sencillos y directos, la energía mecánica de la Naturaleza, regularizarla su acción y llevar adonde convenga, no podemos ya admitir, por lo menos, en absoluto, que la combustión sea la más económica y práctica forma de obtener el trabajo mecánico.

Fijémonos bien en que la generación del trabajo mecánico por medio de la hulla requiere una instalación peligrosa como la caldera, nociva por los gases que desprende la chimenea; y necesita, además, de aparatos complicados, como las máquinas de vapor, para perder, en último resultado, más de un 90 % del trabajo producido por el combustible; y no nos extrañaremos de que, la energía mecánica, repartida con profusión en diversas formas por toda la superficie de la Tierra, regularizada y transmitida por procedimientos industriales, quiera llevar ventaja sobre el trabajo producido por las máquinas de vapor, e intente conseguir, en plazo no remoto, la substitución completa del sistema de los generadores de vapor

Más difícil que esta victoria de la energía de los



agentes naturales sobre la energía calorífica de la hulla parecía a los antiguos, lo que ni siquiera soñaron: la substitución, con extraordinaria ventaja, de la fuerza de los motores animados por la del vapor de agua, y, sin embargo, véase la rapidez con que se ha extendido aquella substitución, y obsérvese, además, la inmensa proporción en que ha aumentado el consumo de fuerza, gracias únicamente a la invención de Watt, pero carbón no le queda al mundo nada más que para unos 200 años.

De los motores de combustión interna de movimiento alternativo y de las turbinas térmicas se podrían también hacer disquisiciones sobre la posible falta de combustibles, pero el rendimiento térmico se ha elevado ya a la proximidad del 50 %. El petróleo se acabará en unos 50 años al ritmo actual. La fabricación de gasolina sintética agotará antes a la hulla.

Para que se vea la enorme cantidad de calor y de energía que se pierde en las operaciones químicas y metalúrgicas, y comprendamos la posibilidad de que, aun en estas operaciones, las fuerzas naturales activas puedan llegar a substituir al combustible, citemos el sólo hecho de que Siemens ha fundido, por medio del arco voltaico, un gramo de acero con una fracción de la energía existente en un gramo de carbón, mien-

tras que en Sheffield se necesitan tres toneladas de coque superior para fundir una tonelada de acero.

*Radiación solar.*—Continuemos discuriendo sobre los manantiales caloríficos de la Naturaleza: De ellos, el astro del día es el más visible y el que más deja sentir sus poderosos efectos; a él se reben la vida y el crecimiento de los seres que constituyen el reino animal y vegetal; él sólo es el que pone en movimiento las inmensas masas atmosféricas; él es el que eleva a la alta región de las nubes todas las aguas con que las lluvias abastecen a las necesidades de nuestro Planeta; él es, aunque indirecto, el primer factor de las corrientes oceánicas, y de la agitación de las olas, y, en una palabra, en él está el origen de cuanto constituye vida y acción en la Naturaleza.

Nos será fácil calcular la cantidad de calor que el Sol cede por metro cuadrado de superficie horizontal en una región determinada, si conocemos un efecto concreto de energía, producido por unidad de aquella superficie. Este efecto, en cantidad determinada, lo tenemos en el volumen de agua evaporada en un tiempo dado.

En Calcuta, situado en una de las regiones más cálidas del Globo, la evaporación anual por m<sup>2</sup> es igual a 5,08 m<sup>3</sup>. La energía que esto representa la resumiremos en la siguiente tabla:

Unidad de tiempo	Altura de agua evaporada	Volumen por m <sup>2</sup> V = litros	Calorías de vaporización C = V × 606,5	$T = \frac{424 C}{75}$ en C.V.
Un año .....	5,08	5080	3.081.020	17.418.033
Un día .....	0,01392	13,92	8.441	47.693
Una hora .....	0,00058	0,58	352	1.987
Un segundo .....	0,000000161	0,000161	0.098	0.548

1 Kg. vapor de agua a 40° c. = 20 m<sup>3</sup>.

El agua evaporada por 1s = 0,000161 Kg. = 0,00322 m<sup>3</sup>.

Tensión del vapor a 40° c. = 53 mm.

En atmósferas = 0,0626.

Presión sobre un m<sup>2</sup> = 720 Kg.

Densidad = 0,00004916.

Como resultado final, vemos que, podemos obtener en Calcuta, por cada metro de superficie expuesta a los rayos solares, un promedio de 0,548 caballos vapor por segundo = 41 Kg/m.

Este resultado es muy apreciable para pensar en su

aprovechamiento, y se entiende que no había de ser muy difícil, utilizando ese mismo vapor a la baja tensión que nos da su temperatura.

Los procedimientos propuestos hasta hoy consisten en concentrar el calor por medio de la refracción y



de la reflexión de los rayos caloríficos, como sucede en los espejos cóncavos de Mr. Moncher.

Para llegar a obtener grandes cantidades de energía tendríamos que construir una instalación muy costosa, a lo que habría que agregar las pérdidas naturales por radiaciones y, muy especialmente, las que llevan consigo la obtención del trabajo mecánico, que es la transformación natural en que busca la energía su principal esfera de acción.

*Calor interno del Planeta.*—Se ha hablado del calor interno del Planeta como otro de los poderosos manantiales de calor que ofrece la Naturaleza; el dato sobre el cual puede basarse algún cálculo es el que nos dice que la temperatura del subsuelo aumenta un grado centígrado por cada 30 metros de profundidad.

Se comprende la gran resistencia que este calor ofrece para la explotación de las minas a gran profundidad, así como para la apertura de pozos y túneles de gran longitud; resultando que son pocas las minas, y aun los pozos artesianos, que han llegado a gran profundidad.

Un ingeniero de Virginia City propuso la calefacción de las casas de la ciudad y la ventilación de las minas cercanas por medio de tubos que tomen el aire caliente en las minas profundas.

Estos ejemplos nos enseñan los estrechos límites en que se mueve la utilización del calor subterráneo; sin embargo, téngase en cuenta que no hay utilización imaginable que no sea aceptable, y aun con ventaja sobre todas las demás, por cara y absurda que parezca, en casos especiales.

#### MANANTIALES DE ENERGÍA MECÁNICA.

*Viento.*—El viento es un poderoso agente motor. Su utilización, como tal, es la más antigua de las aplicaciones de las fuerzas naturales, pues el viento sirvió para el transporte de las naves desde la más remota antigüedad, y el viento hace girar los históricos molinos.

La irregularidad del viento como motor es grande, y, sin embargo, los molinos que a su impulso se mueven fueron siempre ensanchando sus aplicaciones, que hoy aumentan considerablemente cuando, acoplados a dínamos y acumuladores, almacenan la energía, de la

que así puede disponer libremente el consumidor a cualquier hora.

Es indudable que la fuerza existe en cantidad grande y en forma más aceptable, al parecer, de la que hemos visto nos daban los manantiales de calor de que hemos hablado; tratemos de convertir en números estas apreciaciones, calculando la energía por metro cuadrado de sección normal a la dirección del viento y para diferentes intensidades del mismo; lo que se expresa en la presente tabla:

ACCIÓN DEL VIENTO		
Velocidad por segundo	Presión por m <sup>2</sup>	Kg/m. por segundo
	Kg.	
1	0,13	0,1
2	0,54	1
6	4,87	29
7	6,64	46
9	10,97	99
12	19,50	234
15	30,47	457
20	54,17	1083
24	78,00	1872
30	122,28	3674
45	277,87	12587

Interesantes estudios y experimentos se han hecho acerca de la marcha y rendimientos de los molinos de viento, y son dignos de notarse los trabajos de M. Verpin, Morin y Coulomb, de cuyo último autor tomamos el dato más interesante para nuestro estudio.

Dice Coulomb, que puede admitirse que el trabajo anual de un molino de viento no es más que 1/3, próximamente, del que produciría al marchar de una manera continua en las condiciones más favorables, es decir, bajo la acción de un viento de 6,50 a 7 metros de velocidad por segundo.

El trabajo que por metro cuadrado normal representa esta velocidad del viento es de 40 Kg/m. próximamente, siendo en tal hipótesis el promedio anual, por segundo, de unos 13 Kg/m.

Los sistemas hoy en uso no permiten recoger en un solo aeromotor una gran potencia, para lo que tendría que acudirse a acoplar las acciones de muchos de ellos.

Estas breves consideraciones bastan para apreciar el valor práctico y relativo de la energía recibida por transmisión directa del viento, que es, al decir del comandante Riet, de 2 a 6 veces superior en va-



lores absolutos a las posibilidades de la fuerza hidráulica de la propia región.

*Salto de agua.*—Vamos a considerar las condiciones en que nos ofrecen la energía los saltos de agua esparcidos con profusión, aunque con irregularidad, por todos los continentes.

Las aguas que las lluvias vierten sobre la superficie de la Tierra se reúnen en fuentes y torrentes, para continuar su descenso por los cauces de los ríos hasta el mar. El peso de esas aguas, multiplicado por la altura que representa aquel descenso, es el trabajo que aquí se nos ofrece. Trabajo cuya magnitud total, como el de todas las otras fuerzas que venimos examinando, está por encima de cuanto podamos imaginar, aunque, relativamente, no es más que una pequeña porción de la energía que el Sol gastó en evaporar y elevar hasta las nubes el agua de las lluvias, puesto que, la mayor parte de esta energía, la cedió aquella agua a la atmósfera al condensar y al descender desde las nubes hasta la superficie de la Tierra y del Océano.

Los saltos de agua que hasta hoy se han utilizado son aquellos que por su más fácil construcción o por su proximidad a poblaciones o a vías de comunicación podían servir para fábricas que recibieran su movimiento por transmisión directa y continua del eje de la turbina. A pesar de esta limitación, la cantidad de trabajo mecánico que estos saltos de agua dan a la industria es considerable.

En la actualidad, hay construídas instalaciones para utilizar aquellas fuerzas hidráulicas poderosas que antes de ahora eran completamente despreciadas, por radicar en parajes separados de todo poblado, y que producen las tres cuartas partes de la energía eléctrica consumida.

Estos hechos demuestran que se ha llegado ya a soluciones prácticas en el aprovechamiento de los grandes saltos, así como en la transmisión y distribución de la energía por medio de la corriente eléctrica, a pesar de que esos aprovechamientos requieren obras costosísimas, situadas casi siempre en terrenos escarpados, desiertos y desprovistos de toda vía de comunicación, que exigen, además, larguísimas conducciones eléctricas de alta tensión.

El precio de estas obras, en relación con la energía aprovechada, es muy variable; pero aun así, la seguridad y constancia con que en la mayor parte de los casos se presenta esta energía la hacen preferible a to-

das, siempre que el punto de su aprovechamiento se encuentre dentro del radio de acción, ya hoy muy grande, a que práctica y económicamente pueda alcanzar la transmisión eléctrica.

De la hulla blanca se utiliza como un 15 % de la posibilidad mundial, pero como se ha aprovechado lo más fácil, será creciente el precio futuro del kilovatio instalado.

*Mareas.*—Nuestro ilustre compatriota don Eduardo Benot, escribió, hace unos 75 años, una importantísima obra titulada *Movilización de la fuerza del mar*, que mereció ser publicada a expensas de la Real Academia de Ciencias de Madrid, en la que enseña la importancia de estas fuerzas y la posibilidad de conquistarlas.

Deduce Benot, teniendo en cuenta todas las variaciones de las mareas, que éstas pueden dar en Cádiz un promedio de 7,9 caballos de vapor constantes por segundo en cada 72.000 m<sup>2</sup> de superficie de la dársena o ría que se utiliza.

Si bien este resultado parece pequeño, téngase en cuenta que la obra que ha de representar la marea no está en relación con la superficie, sino con la sección de la boca de entrada; y, por esta razón, pueden, muchas veces, encontrarse parajes que, como la bahía de Cádiz, tengan gran superficie interior y pequeña entrada relativa, y, por lo tanto, pueda obtenerse gran fuerza con un gasto de instalación relativamente pequeño.

Pero, de todos modos, la naturaleza de esta fuerza exige un emplazamiento forzado ocupando una dársena, que queda inútil para otros servicios, requiere que sea mucha la fuerza que trate de aprovecharse, y reclama obras importantes y costosas, cuyas desventajas hacen la idea poco práctica.

En España, las mareas se aprovechan en Cádiz desde la Edad Media, y desde 1830 en la vía de Muros (Coruña). En 1903 se ensayaban las mareas para aprovecharlas en Boston, Estados Unidos de América; después ha habido instalaciones que aprovechan condiciones naturales en Inglaterra y en Francia.

*Olas.*—Dedujimos ya el trabajo de las olas; aquellos resultados nos ponen bien de manifiesto que la fuerza de las olas resulta mucho mayor que cualquiera de las que acabamos de examinar, por unidad de superficie utilizable; y es también la más importante, por su situación, puesto que se encuentra distribuída



en todas las regiones y en todos los mares, con acceso inmediato a todas las costas, cualquiera que sea su forma y ya estén situadas en los continentes, como en las más pequeñas islas.

Si es o no práctico su aprovechamiento, podremos apreciarlo, como resultado del estudio que serán desarrollados en los siguientes capítulos; pero hemos visto ya lo que son las olas y la energía que en Barcelona nos ofrecen, que no es ni la mitad de la que nos ofrecerían en el Atlántico, y al compararla ahora con la que nos brindan los otros manantiales de energía dinámica, bien clara nos resulta su grande y efectiva superioridad teórica.

Edison, la primera vez que vino a Europa, y según cuentan sus contemporáneos, estuvo la mitad del viaje sobre la borda del buque como hipnotizado, y decía que pensaba en toda esa fuerza perdida.

Esta superioridad la ven ya y la pregonan hoy en las revistas técnicas las eminencias, quienes ante los progresos materiales de los últimos veinte años, no dudan que ha de llegar pronto la conquista de la energía de las olas.

Pocos fueron los que antes de ahora, dieron a esa energía la importancia que requiere; la vió, no obstante, M. Delaurier, quien, como dice el mismo Benot, estimó que debía utilizarse antes la fuerza de las olas que la del flujo y reflujo, porque ésta exige depósitos y construcciones muy costosas; y agregaba: «Existe una fuerza de las más poderosas que se deja perder... Esta fuerza inmensa, miriadas de veces mayor que la de todas nuestras máquinas de vapor juntas, de todos nuestros caballos, de todos nuestros molinos de agua y de viento, que creará riquezas incomparables, en la fuerza de la agitación de las olas...»

### III. MEDIOS PROPUESTOS HASTA HOY PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS

En dos grupos podemos clasificar los procedimientos propuestos hasta ahora para el aprovechamiento de las olas, que son: 1.º, por medio de flotadores que transmiten sus movimientos a órganos mecánicos emplazados en las costas; y 2.º, por medio de malecones que recojan las rompientes de las olas en depósitos más altos que el nivel medio del mar, para obtener luego un salto hidráulico. Con los innumerables sistemas de flotadores, diques, compuertas, etc., propuestos hasta

hoy, sólo se ha tratado de conquistar la energía que ofrecen las manifestaciones exteriores del oleaje, que eso son los desniveles y rompientes, sin que se haya pensado en la utilización de la energía que en sí llevan las olas oscilantes.

Los procedimientos de aprovechamiento de las olas por medio de flotadores, como el de Barrufet que se instaló en Barcelona, y otro descrito por la revista *El Cosmos*, que se estableció con mucho aparato en California, no han agregado nada nuevo a la solución del problema; y, por el contrario, han hecho evidentes sus muchos inconvenientes. Los señores Sanromá y Llena, en 1928, en la costa catalana, aprovechaban el oleaje con boyas, palancas, arcos dentados y piñones locos con trinquetes que los solidarizaban para el aprovechamiento ascendente y descendente, y con olas de 2 m. de altura cada flotador, de 4 m. de diámetro y 5 de altura, producía 120 caballos de fuerza, según reseña el ingeniero industrial D. Juan Sala Simón.

Aun cuando concibamos un sistema de flotadores perfectamente emplazados con todas sus formas y dimensiones divinamente estudiadas, con una instalación indestructible y con transmisiones las más ingeniosas, para que casi todo su trabajo sea transformado en efecto útil, el sistema lleva en sí, en los flotadores, su defecto principal.

En efecto; el trabajo máximo que puede dar un flotador es igual al peso del volumen de agua que desaloja, multiplicado por su recorrido vertical, en cuyo producto, el primer factor es constante y el segundo crece, tan sólo, con la altura de la ola, mientras que el trabajo que la ola ha podido dar en la superficie ocupada por el flotador es proporcional al cubo de la altura, según vimos en el capítulo correspondiente.

La desproporción entre el trabajo que ofrece la ola y el que el flotador puede transmitir, crece de punto, si se tiene en cuenta que las olas pequeñas no llegan a cubrir el flotador, y que en las olas grandes, el recorrido es igual a la altura de la ola, menos la altura del flotador.

Si a esto agregamos lo costoso de la instalación para que sea sólida, lo engorroso de las transmisiones y las pérdidas de energía que representa la necesidad de sumar muchos efectos intermitentes parciales en uno sólo regular y constante, por medio de mecanismos rígidos y pesados, tendremos que convenir en que el sistema



de aprovechamiento de las olas por medio de flotadores es defectuosísimo y hasta absurdo.

Y nada hemos dichos de los efectos que producirían en esas instalaciones los rompientes, porque este inconveniente es general para todos los sistemas ideados hasta el día, puesto que todos ellos han de emplazarse, forzosamente, en la zona en que se verifican los rompientes.

En 1903, el capitán de Ingenieros señor Ibáñez, aprovechaba la fuerza viva de traslación de la rompiente de la ola, para comprimir aire en un colector de presión, lo que ensayó en Sitges (provincia de Barcelona), imitando las «bufaderas» naturales, al utilizar repito, la propulsión horizontal de las ondas rompientes. En 1908, el capitán señor Pirandelo, en Italia, hizo varias publicaciones de sus ensayos esperanzados. El «ariete hidráulico de cámara barométrica», ensayado aproximadamente en 1930 en las olas de traslación o rompientes en Biarritz. La «ondo-bomba» en servicio en el Museo Oceanográfico de Mónaco consiste en un pistón que sube con el flotador y bomba el agua para los «acuarius» del Museo; fué ideado en 1919 y perfeccionado a los 12 años de su funcionamiento por el propio autor, siendo de resultados modestos, pero eficaces.

Se citan estos varios para recordar los más próximos y de los que alguna vez ha aparecido algo impreso en las reseñas de nuestras publicaciones.

Dos dificultades enormes han detenido hasta hoy junto a la orilla a los que han tratado de aprovechar el oleaje: la una, es la dificultad en que estaban de transmitir la energía a tierra desde alta mar, y la otra, es la de no encontrar el necesario punto de apoyo, sin el cual, como indica M. Divoire, y ven todos, no hay fuerza posible. La primera la ha resuelto por completo la corriente eléctrica; y en cuanto a la segunda, no es fácil que, dentro de los procedimientos, en cuyo estrecho círculo se agitan todos los hasta hoy propuestos para el aprovechamiento de las olas, se encuentre ese codiciado punto de apoyo, sin el cual, hasta la elemental palanca hubiera fracasado.

Y he aquí cómo, al ver que un día y otro, cuantos inventores se suceden, quedan encerrados en ese círculo vicioso, se comprende ya que se desconfíe, casi en absoluto, de encontrar solución para el importante problema que nos ocupa.

No hay, pues, hasta hoy, el más pequeño indicio de

solución práctica para el aprovechamiento de las olas; el mundo industrial empieza a darse cuenta de la existencia de ese manantial inmenso de energía; se siente ya que esa es la única representación de las fuerzas naturales cuyo oficio se limita a ofrecer su trabajo, para lo cual brama sin descanso alrededor de todos los continentes desde el principio de los siglos... Pero los inventores se suceden, como las olas, para estrellarse todos contra sus rompientes...

¿Y nosotros queremos dominar a ese mar que, si inmenso en sus dimensiones, lo es mucho más en la cantidad de su energía activa?... Durante algunos años hemos vacilado ante la grandiosidad del asunto; pero el tiempo aumenta nuestra fe, y confiamos en que, por lo menos, aportaremos nuevo rayo de luz, nueva orientación.

## SEGUNDA PARTE

### NUESTRO APARATO MOTOR MARINO CELULAR

#### IV. ELEMENTO SIMPLE

En el fondo del mar y en sitio separado de las rompientes cimentemos un poste recto delgado y resistente, de manera que salga por encima de la superficie líquida.

En el extremo libre de este poste fijemos un tubo recto en posición vertical, que tenga: una sección cualquiera, pero limitada en sus dimensiones, para que la cresta de una ola no quepa por completo en ella; altura suficiente para que al sobresalir algo por encima de las mayores olas, permanezca siempre, en su boca inferior, dentro de las aguas, y en su parte alta y cubierta, dos aberturas espaciosas, provistas de válvulas que se abran en sentido contrario la una de la otra, y que respectivamente den acceso a otros dos tubos independientes entre sí. (Véase la figura 1.)

Observemos que, alrededor de este sencillo aparato, las olas se suceden, prescindiendo de ligeros rozamientos, como si tal cosa no existiera, y que lo mismo acontece en su interior, cuando las válvulas están libres o abiertas.

Abstraigamos del resto del Océano los movimientos que se verifican el interior de este tubo o *celda* (que así lo llamaremos en lo sucesivo) y notaremos: que los



ascensos y descensos del líquido que en él se verifican, se repiten con regularidad casi perfecta, para un mismo estado del mar; que estos movimientos son parecidos a los de un émbolo líquido de las máquinas de comprimir aire; que, como en éstas, el aire es el receptor de la energía que le transmite el émbolo, y,

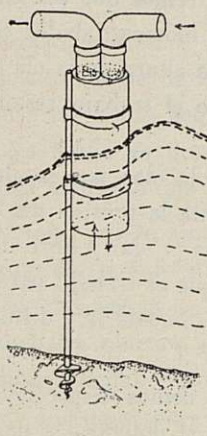


Fig. 1

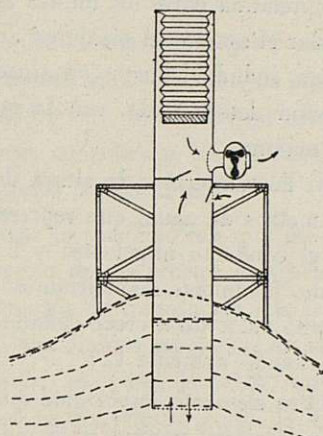


Fig. 2

finalmente, que las dos válvulas y conductos correspondientes establecen una separación perfecta de los movimientos de empuje y de absorción que recibe el aire.

Estas dos corrientes, impelente y aspirante, engendradas por el émbolo líquido, resultarán intermitentes; pero ha de ser fácil transformarlas en corrientes continuas y de presión constante, si establecemos en un ensanche de los respectivos conductos un gasómetro, fuelle o cosa análoga que compense las acciones irregulares.

De tres maneras podremos aprovechar estas corrientes: 1.<sup>a</sup>, utilizando únicamente la impulsión; 2.<sup>a</sup>, sirviéndonos sólo de la aspiración, y 3.<sup>a</sup>, combinando ambos efectos.

Utilizaremos únicamente la impulsión, cuando el conducto o válvula de la aspiración comunique con la atmósfera directamente. Este caso está representado en la figura 3, en la que, por encima de la celda, se emplaza un fuelle cilíndrico vertical, ocupando un ensanche del tubo impelente; fuelle, que lleva en su fondo móvil el peso necesario para dar al aire motor una presión constante, y cuyo peso puede cambiarse a voluntad, para tener en cuenta las variaciones producidas por los diferentes estados del mar. El motor,

sobre el que actúa la corriente, es un ventilador de tipo Root, al que por medio de un regulador podría dársele una velocidad constante.

Nos serviremos sólo de la aspiración, cuando el conducto de la impulsión comunique directamente con la atmósfera. La figura 3 (que, como todas las que vamos presentando, es simplemente un esquema de la idea que tratamos de explicar) representa el segundo caso: conocido el anterior, fácil es comprender éste, con la sola inspección de la figura, en la que se notará que, el peso del fuelle obra a la inversa del otro, produciendo en el conducto una presión negativa.

Finalmente, se combinarán los efectos impelente y aspirante, cuando el aire motor no comunica con la atmósfera, sino que, como indica la figura 4, la corriente impelente que pasa por el aeromotor va luego al conducto aspirante, desde donde vuelve a la celda, cerrándose así un ciclo completo. Si, en el caso presente, limitamos la carga del contrapeso a equilibrar la gravedad del fuelle aspirante, la presión en este conducto será igual a cero, o sea a la atmosférica; no utilizaremos entonces más que la corriente impelente, pero conservaremos el ciclo del aire transmisor y motor.

Los aparatos receptores de la corriente aérea no influyen en la manera de aprovecharla, pues todos los

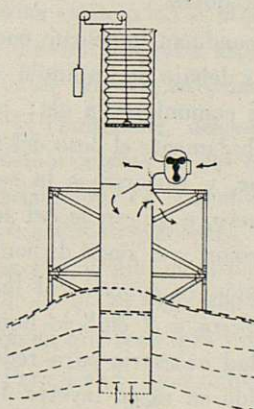


Fig. 3

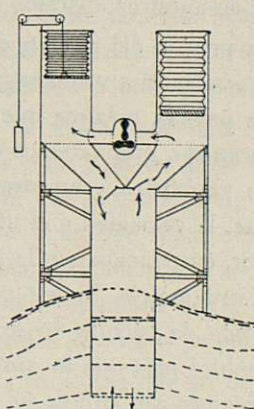


Fig. 4

hasta ahora conocidos, como turbinas, hélices, ventiladores-rotativos, etc., se avienen a ejercer de aeromotores, lo mismo con corriente impelente que con aspirante, teniendo sólo en cuenta la diferencia de presiones; luego, desde este punto de vista, no requieren estudio especial los tres sistemas enunciados, aunque las



hélices con número de aspas variables, pero bien elegidos sus parámetros de perfil, forma y estructura, se llevarían la palma en la joven ciencia aerodinámica.

No sucede lo mismo cuando tratamos de indagar la manera de actuar la ola en el interior de la celda para cada uno de los tres casos; en efecto, la acción impelente del émbolo líquido es, como ya vimos en el primer capítulo, un esfuerzo de toda la masa de agua que la ola mueve en la proyección de la celda, mientras que la acción aspirante del mismo émbolo sólo nos transmitirá un esfuerzo debido al desnivel exterior, esfuerzo que, evidentemente, es bastante más limitado que el de la impulsión.

Querer aprovechar todo el ascenso y el descenso de una ola sería un absurdo; cabe, sin embargo, combinar sus dos acciones, pero en ningún caso la energía que obtengamos será mayor que la que por sí sola puede darnos la ola ascendente; pues es axiomático, después de lo dicho, que todo lo que restemos a la acción de la ola ascendente, para aprovecharla con la descendente, será en detrimento de la acción total. Resulta, por lo tanto, preferible aprovechar la ola en su movimiento hacia arriba, bien sea con entera independencia del descenso, como en el caso primero, o bien sea al utilizar ese descenso, como se dijo en el caso tercero, tan sólo para cerrar el ciclo de la corriente motriz aérea. Ciclo que, como luego veremos, es la base de nuestros aparatos flotadores.

La presión del aire en el conducto impelente podremos graduarla a voluntad por debajo de un límite, que es la presión máxima que le comunique la ola; para conseguirlo, graduaremos debidamente el peso del fuelle o gasómetro compensador, y variaremos la resistencia, la velocidad o el número, o superficie del aeromotor, en relación con la presión y el gasto disponible del aire motriz. Si esa presión es superior al límite máximo, la válvula no se abrirá y el émbolo líquido no subirá más que la cantidad necesaria para reducir el volumen del aire de la celda en razón inversa de la presión, con arreglo a la ley de Mariotte; y si, por el contrario, la presión sobre la válvula es la misma de la atmósfera, el émbolo líquido hará su recorrido máximo, igual a la altura de la ola, y entrará en el conducto impelente un volumen de aire tan grande como el ocupado por la ola en la celda.

Entre estos dos límites estará comprendida la presión que demos al aire motriz, deduciéndose que, cuan-

to mayor sea dicha presión, menor resultará la cantidad de aire que entre en el conducto, porque menor también será el recorrido del émbolo en la celda; y viceversa: a menor presión corresponderá más volumen de aire mayor recorrido de la ola interior.

Quedaremos, pues, siempre en libertad de poder hacer trabajar a los aeromotores con cualquier presión comprendida entre los límites extremos que sea capaz de dar el estado del oleaje en un momento dado; pero habrá, indudablemente, para cada altura de la ola una presión determinada, con la que el trabajo resultará un máximo.

Si llamamos  $A$  a la altura de la ola;  $a$  a la altura en metros de agua, que representa la presión del aire en el conducto impelente; y  $L$  a la altura libre de la celda, fácilmente deduciríamos que el trabajo para un mismo valor de  $a$  crece cuando aumenta  $A$  y disminuye cuando aumenta  $L$ .

Otro elemento importante que hemos despreciado es la aspiración, porque si la ola, al obligarla a dar su trabajo con la impulsión a la presión  $a$ , no quedó anulada en el interior de la celda, es porque no cedió toda su energía, y al descender tendrá aún fuerza aspirante que arrastrará tras sí el aire motriz.

La transmisión de la energía por medio de aire se verifica en las mejores condiciones que pueden desearse, puesto que ese aire, en continuo contacto con los émbolos líquidos, estará saturado de humedad, con lo cual, al comprimirse, cuando recibe la impulsión no desarrolla, ni con mucho, el calor termométrico que originaría el aire seco; por otra parte, en la celda, alterna la compresión con la absorción, y sus paredes metálicas se mojan frecuentemente por ambas caras y están en continuo contacto con el agua del mar; motivos más que suficientes para poder asegurar que la temperatura del aire motriz permanecerá constante, a pesar de las continuas compresiones y dilataciones que experimente. Además de esto, las presiones a que trabajará ese aire, si bien son muy superiores a las que transmite el viento más impetuoso, quedan por debajo de las que la prudencia aconseja como máximas para obtener buen rendimiento con transmisiones de aire comprimido.

En estas condiciones, el aire no sólo es el transmisor más dúctil y más dócil que se conoce, sino que, además, es superior a todos por su buen rendimiento práctico. Nos confirma en esto el hecho de que com-



presores de émbolo líquido, en buenas condiciones, con frigorización e inyecciones de agua pulverizada, han llegado a comprimir aire con un rendimiento del 95 por 100; y otros hechos, referentes a la transmisión, como el que nos dice un competente autor, «que para una tubería de 6.000 metros y a la presión de 7 atmósferas, la pérdida por causa de la canalización nunca llega al 5 por 100.

Cuanto acabamos de decir de la celda, que forma el elemento simple de nuestros aparatos, será de aplicación a las celdas acopladas que, formando un conjunto, ya fijo o ya flotante, constituyen los aparatos de celdas múltiples que vamos a describir.

Hemos podido apreciar la sencillez con que ese elemento, sin recibir ninguno de los efectos destructores de las olas, recoge su energía, la transforma y la transmite hasta obtener en un órgano mecánico el movimiento circular continuo; es, pues, la celda, un órgano adecuado para el fin propuesto, como lo es el pararrayos para la chispa eléctrica, pues así como esta débil varilla sujeta y dirige la furia del rayo, nuestra sencilla celda sujeta y dirige por completo los movimientos del impetuoso mar.

Para terminar con lo referente al elemento simple, indicaremos su aplicación a la marea. En rigor, la marea no es más que una ola de gran extensión y de pequeña altura relativa; luego su aprovechamiento podrá obtenerse por medio de una sola celda de grandísima sección; o en pequeño, con una celda de sección cualquiera. Las variaciones de la celda para esta aplicación consistirían en que no habría necesidad de depósitos de aire, y en que éste actuaría directamente sobre el motor, impeliendo durante la subida y aspirando en las horas de bajada. Las sencillas modificaciones que esto implica están al alcance de todos.

Las celdas, para la marea, podrían también consistir en grandes cavidades practicadas en las laderas junto al mar, en comunicación con el mismo por la parte inferior, de la altura necesaria para que el flujo no llegase al techo y el reflujo no dejase en seco el suelo. No creemos, sin embargo, práctico este aprovechamiento, dada la pequeña fuerza que la energía de la marea representa por segundo y por unidad de superficie; lo apuntamos sólo para que se vea la generalidad del sistema.

## V. APARATOS FIJOS DE CELDAS MÚLTIPLES

Varias o muchas celdas pueden acoplarse reuniendo en uno solo todos los conductos ímpelentes, y en otro todos los aspirantes. La figura 5 es un esquema del acoplamiento que indicamos.

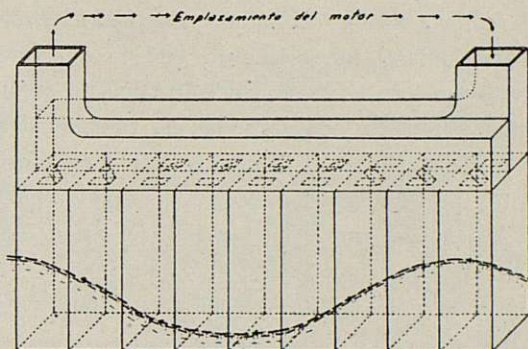


Fig. 5

Con esa unión de celdas conseguimos no sólo que las acciones de todas se sumen en una sola corriente aérea, sino que además, esa masa fluida allí encerrada, dotada de gran elasticidad, y desprovista de cohesión que coarte sus movimientos, sea por sí sola la que compense y regule todas las acciones irregulares que de los émbolos líquidos recibe.

Para obtener estos resultados es indiferente que las celdas estén o no contiguas, como también lo es que suprimamos el tubo aspirante, dejando sus correspondientes válvulas en comunicación con la atmósfera.

Se comprende, después de cuanto sabemos acerca del movimiento de las olas, que para su mejor aprovechamiento es conveniente que las celdas no estén agrupadas en pelotones, sino ocupando zonas estrechas y largas, y aun, si es posible, de manera que la longitud de su emplazamiento esté orientada en la dirección en que sean más frecuentes los vientos irapetuosos.

Pero siendo invariable la dirección que se dé a un aparato fijo, debemos observar que no es inconveniente grave, a pesar de lo que acabamos de decir, que el viento y las olas vengan más o menos oblicuamente a la dirección general de la instalación; lo que interesa más es que las acciones ímpelentes no se verifiquen en todas las celdas a un mismo tiempo, y esto se consigue si los aparatos están próximos a la playa, no dándoles una dirección paralela a la orilla y, en



todo caso, haciendo que su planta afecte una forma curva o quebrada.

La abundancia de celdas permitirá sumar grandes cantidades de energía, y simplifica más y más los mecanismos. Al variar la intensidad del oleaje podremos optar por uno de los dos procedimientos siguientes, para su mejor aprovechamiento: 1.º, agregar o disminuir resistencias (dínamo o máquinas herramientas cualesquiera) al aeromotor, con lo cual variará automáticamente la presión del aire motriz siguiendo constante el gasto y la velocidad de rotación del motor, y 2.º, aumentar o disminuir el número de aeromotores que se pongan en acción y sus correspondientes resistencias, con lo cual variará el gasto del aire motriz mientras se conserva, automáticamente, la misma presión y la misma velocidad en todos los aeromotores.

Como según vimos al tratar de las olas, un ligero aumento en el oleaje implica un gran aumento en la cantidad de energía disponible; será conveniente instalar los motores de manera que a cada uno, en un mismo eje, puedan acoplarse varias dínamos u otras resistencias, y que al mismo tiempo también puedan ponerse en movimiento mayor o menor número de motores en cualquier momento, cosas ambas fáciles de conseguir.

Regularizaremos así los motores todos para funcionar a velocidades constantes con aire a mayor o menor presión, y el aprovechamiento del oleaje se conseguirá, cualquiera que sea el estado del mar, en la forma más conveniente para que nos produzca el mayor rendimiento posible.

De ahí se deduce que el número y disposición de los motores en cada aparato debiera ser tal que cuando el oleaje sea un máximo se puedan mover todos con todas sus resistencias, sin que quede sobrante de energía; y cuando el oleaje sea un mínimo, pueda moverse, a lo menos uno, con su resistencia mínima.

La cimentación de los aparatos compuestos puede estar reducida a postes ligeros y rígidamente instalados, o consistir mejor en armazones de hierro laminado, bien tramados y arriostrados en todas sus partes, teniendo siempre en cuenta que los esfuerzos mayores serán verticales y hacia arriba.

Estos armazones, emplazados lejos de los rompimientos, opondrán pequeña resistencia a los movimientos del mar; y con dispendios relativamente pe-

queños podrán adquirir mayor rigidez y estabilidad que la que consiguen tantos otros instalados sobre las mismas rompientes, entre los que se cuentan muchos muelles y embarcaderos de minerales, establecimientos de baños, el gran café-teatro en Niza, etc.

La disposición de los aeromotores será objeto de estudio especial para cada aparato fijo, apreciándose, desde luego, dos casos generales: que se instalen en tierra firme o que se coloquen sobre el mismo aparato.

Cuando las celdas acopladas lleguen cerca de la costa, podrá convenir la prolongación de los conductos de aire, apoyados en buenos postes, hasta ganar la orilla, y cimentar allí, bajo tejado, los motores y transmisores con arreglo al destino que deba darse a la energía. Si por el contrario, el aparato se encuentra bastante separado de tierra, será, sin duda, más ventajoso situar sobre el mismo una cámara cubierta, en la cual se instalen motores y herramientas o motores y dínamos que por medio de cables submarinos envíen el fluido hasta la vecina orilla.

Después de cuanto llevamos dicho, nos haremos cargo de la infinidad de formas que en la práctica podremos dar a los acoplamientos de celdas, entre cuyas formas posibles presentamos la dibujada en la figura 6, que representa un aparato fijo de celdas múltiples, no contiguas, con los motores en tierra.

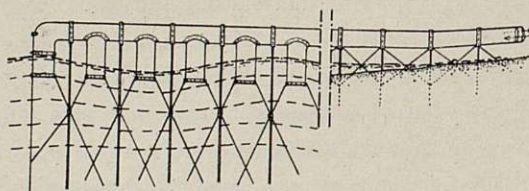


Fig. 6

Las figuras 7 a 14 representan distintas vistas y secciones de otro aparato fijo de celdas múltiples, contiguas, con cámara para los motores. En este aparato obsérvase una disposición general por pisos horizontales, que de arriba para abajo son: cubierta, cámara de motores, conductos de la corriente aérea motriz, celdas y cimentación. Las ideas generales expuestas, la sencillez de los aparatos y los detalles de las figuras nos excusan de más minuciosas explicaciones.

La cantidad de energía que recoja uno de estos aparatos se deduce al conocer la superficie que ocupan sus celdas, y esta superficie puede llegar a ser considerable.



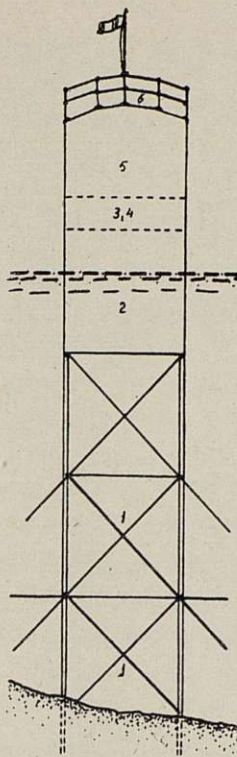


Fig. 7.  
Vista de frente.

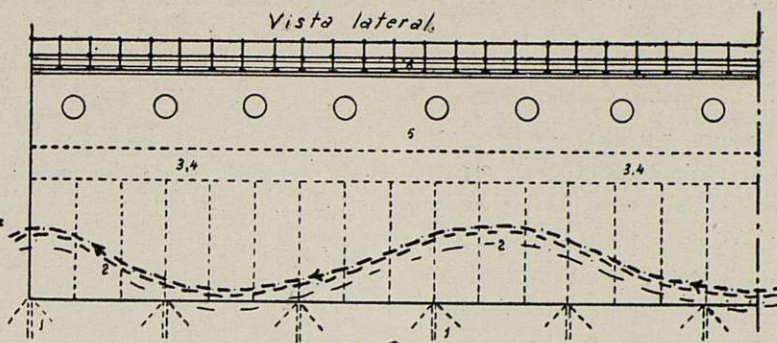


Fig. 8.

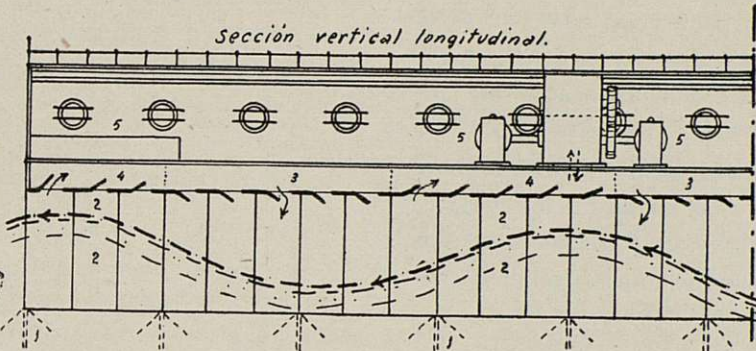


Fig. 11.

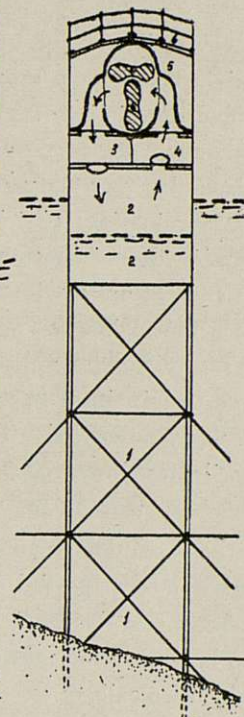


Fig. 14.  
Sección vertical  
transversal.

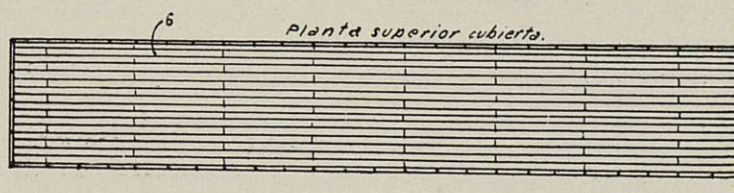


Fig. 9

#### Referencias.

- 1= Armazón.
- 2= Celdas
- 3= Conducto aspirante.
- 4= Conducto impelente.
- 5= Cámara de motores.
- 6= Cubierta.

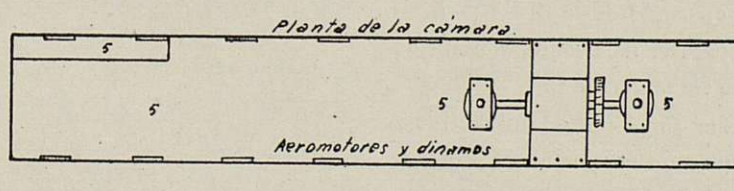


Fig. 12

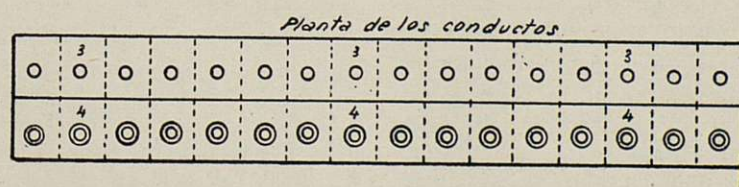


Fig. 13.

Escala 1/200.

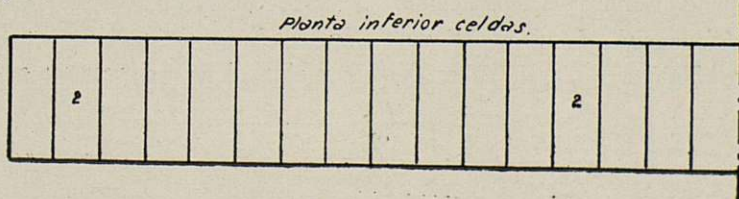


Fig. 10



## VI. APARATOS FLOTANTES

*Generalidades.*—La cimentación de los aparatos fijos exigía condiciones especiales de orientación y profundidad que limitaban el campo para sus instalaciones; y aunque dentro de esas limitaciones, queda espacio disponible para obtener del mar cantidades de energía extraordinarias; es evidente que si conseguimos la supresión de esa cimentación rígida, si podemos obtener la energía del oleaje con aparatos flotantes, ampliaremos muchísimo ese campo de acción y mejoraremos las condiciones de aprovechamiento de las olas, puesto que podrán instalarse en puntos más separados de las costas y de los bajos fondos, puntos en donde las olas oscilantes, libres de toda modificación accidental, tienen una marcha más regular y constante.

Los aparatos flotantes, amarrados a una fuerte boya, desde la cual partirá el cable de conducción de la corriente eléctrica hasta la tierra, se orientarán en roda, en la disposición más conveniente para recibir la energía del oleaje.

Las mareas, que para los aparatos fijos, si no son obstáculo insuperable, son grave inconveniente; para los flotantes no tendrán importancia alguna.

Bajo el punto de vista constructivo, los aparatos flotantes tendrán las ventajas importantísimas de trasladar con facilidad su emplazamiento, construirse por completo dentro de un arsenal y poderse retirar a puerto seguro para sus reparaciones.

Y como servicios ajenos a su fin inmediato, los aparatos instalados en sitio apartado de la orilla podrían ejercer de faros y guías para el navegante, y hasta de refugio para las pequeñas embarcaciones.

¿Pero tendrá ese aparato suficiente estabilidad? ¿Y cómo sustituiremos el punto de apoyo tan indispensable para conseguir la fuerza?

Estas dos son las cuestiones principales que debemos aclarar, puesto que en cuanto a su forma general y a su construcción no existen, según hemos dicho, diferencias esenciales entre los aparatos fijos y los flotantes.

*Estabilidad.*—Veamos primero lo que a la estabilidad se refiere, y notemos que, en rigor, el aparato no flota en el agua, sino en el aire contenido en sus celdas y conductos; lo cual, lejos de disminuir las condiciones de su flotabilidad, se las aumenta, de tal modo, que teóricamente un aparato flotante de gran superficie

debe permanecer inmóvil en medio de una revuelta marejada.

Para hacernos cargo de esta verdad, fijémonos en lo que pasaría a un flotador que fuera de las condiciones que indica la figura 15; es decir, constituido por un cajón de grandísimas dimensiones, dividido en cuatro compartimientos y colocado boca abajo en las aguas del mar, de modo que en aguas tranquilas las paredes entren unos dos metros bajo el nivel del líquido.

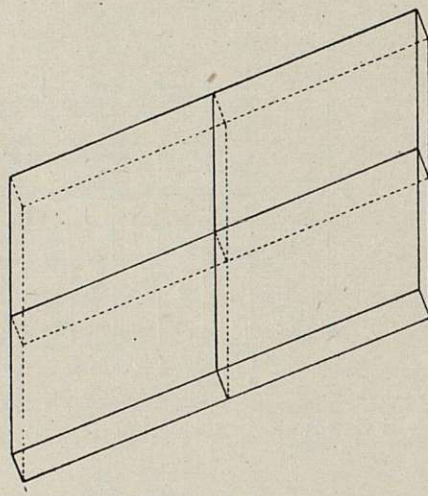


Fig. 15

Este flotador descansará en el aire encerrado entre la superficie del mar y su base superior. En cada uno de los compartimientos o grandes celdas, cabrán varias olas positivas y negativas, que sin obstáculos seguirán cruzando por aquella porción cubierta, y el aire allí encerrado, sin cohesión que lo impida, libre y dócil, se amoldará a todas las formas a que le obliguen las rugosas y movedizas aguas, pero sin ceder de su volumen, porque la presión a que está sometido será siempre la misma, debida a la presión atmosférica aumentada con el peso del cajón.

Si suponemos que las olas que pasan por debajo de cada uno de los compartimientos son de dimensiones diferentes, se verificarán en cada uno de ellos empujes desiguales, que serán contrarrestados por los que en las otras grandes celdas se verifiquen en sentido contrario. Estas diferencias, en la práctica insignificantes, darían lugar a movimientos imperceptibles del aparato; luego es hecho evidente que las causas, o mejor dicho, las resultantes de las fuerzas que ac-



túan para que este flotador se mueva, son muchísimo más pequeñas que las que motivan los movimientos de los flotadores ordinarios.

Se consigue esto, a pesar de la ley que rige para la estabilidad de los cuerpos flotantes, según la cual nuestro flotador, por tener el centro de gravedad más alto que el de presión o de carena, tiene también el metacentro por debajo del centro de gravedad, y por consiguiente, su flotabilidad sería inestable si no hubiera otras fuerzas que se opusieron a su cambio de posición.

Para reconocer cuáles sean estas fuerzas, representaremos en las figuras 16 y 17 una sección vertical del gran flotador últimamente descrito; en el cual, vamos a suponer que el centro de gravedad, en virtud de la carga que hemos situado sobre la plataforma, se ha trasladado al punto N; es decir, que las condiciones de equilibrio de que goza el aparato, con arreglo a

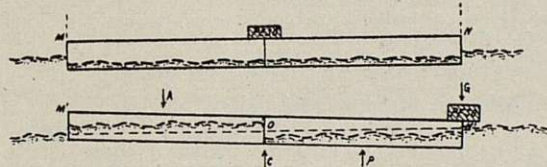


Fig 16 y 17

la ley general de flotabilidad, no pueden ser más detestables, pues la fuerza G de la gravedad que obra en N, y la fuerza de empuje C, que obra en el centro de carena en sentido contrario de la anterior, tienden a hacer girar el aparato con tanta mayor actividad cuanto mayor es la separación de sus respectivos puntos de aplicación.

Sin embargo, el aparato se limita a iniciar un pequeño giro, tomando la plataforma MN la nueva posición M'N' que se señala en la figura, y permaneciendo así en equilibrio estable. Si observamos lo que pasa en los dos compartimientos, notaremos que mientras en el ON el aire está comprimido y el nivel del agua es inferior al exterior, en el OM sucede todo lo contrario, el aire está enrarecido y el nivel está elevado. De donde resultan dos fuerzas poderosas: de compresión P la primera, y hacia arriba; y de aspiración A, y hacia abajo, la otra. Fuerzas que no son más que manifestaciones de la presión atmosférica, la cual actúa en sentido contrario en cada una de las dos cámaras, para contrarrestar las acciones diferentes que respectivamente se producen en cada una de ellas, en virtud de la

forma especial de dichas cámaras y de la posición relativa del centro de gravedad del aparato.

Este par de fuerzas reúnen propiedades verdaderamente especiales para conservar la estabilidad del flotador, veámoslas:

1.º, están latentes mientras su presencia no es indispensable para mantener el equilibrio;

2.º, su intensidad crece en la misma proporción que reclama la fuerza perturbatriz;

3.º, cambian su posición respectiva cuantas veces se altera el sentido o el punto de aplicación de la fuerza perturbadora;

4.º, contrariamente a lo que sucedía a las fuerzas que actúan en el centro de gravedad y en el de carena; con la separación de los puntos de aplicación aumenta la estabilidad del flotador;

5.º, crece su eficacia con el mayor calado y con el menor volumen de aire encerrado, siempre que éste sea suficiente para sostener el aparato a flote, con arreglo a la ley de Arquímedes;

6.º, mantiene el equilibrio aun en el caso en que la fuerza G de la gravedad caiga fuera de la base de sustentación, y

7.º esas fuerzas nos permiten: cargar la plataforma con todo el peso que nos convenga si teniendo el aparato altura suficiente aumentamos en proporción el aire encerrado en las cámaras, y distribuir ese peso, como queramos, si el calado es adecuado para la posición de equilibrio que corresponda.

Cualquiera que sea la irregularidad de la distribución de la carga sobre la plataforma de ese flotador, se concibe que podremos hacerla recuperar su posición horizontal inyectando más aire en la cámara en que éste está comprimido, o extrayéndolo de la en que está enrarecido, o combinando ambas operaciones.

Cuando completando el aparato situemos los aeromotores y hagamos actuar en ellos las corrientes de aire, es evidente que todas aquellas fuerzas que se invierten en hacer circular el aire y girar el motor, es decir, todas las fuerzas que podremos llamar útiles, no ejercerán más que acciones muy secundarias contra la estabilidad del aparato; luego estos flotadores gozan de las buenas condiciones de estabilidad que hemos visto adquieren los de celdas de circulación libre.

Necesariamente había de suceder así, pues al aprovechar la energía de las olas anulamos su movimiento,



que queda transformado en la corriente de aire a presión, que circula por los conductos impelente y aspirante corvirtiéndose, a su vez, en el movimiento circular continuo del aeromotor.

Si por la desigualdad de las olas que en un momento dado actúan en el aparato, sufriera éste alguna oscilación o cabeceo, estos movimientos influirían en los que los émbolos líquidos verifican en sus respectivas celdas, pues equivaldrían a mover en el sentido longitudinal el cilindro o caja de dicho émbolo, y resultaría que mientras en las celdas en que el émbolo y la caja se movieran en el mismo sentido, el trabajo total saldría perjudicado; en las que el sentido de los dos movimientos fuera contrario, el trabajo total se aumentaría, y se producen en consecuencia dos resultados notables: 1.º, que los movimientos de los émbolos líquidos de las celdas ejercen de freno para los movimientos oscilantes del aparato, sumándose en las mismas celdas la energía que pueden dar esas oscilaciones, a la que aquellas reciben directamente de las olas, y 2.º, que recíprocamente, cuando por exceso de presión en los conductos impelentes, debido al aumento de resistencias o al aumento del tamaño de las olas, éstas no puedan inyectar aire, su exceso de fuerza se dedicará, automáticamente, a elevar el aparato, produciendo el consiguiente cabeceo.

Resulta de todo esto una compensación perfecta entre todas las acciones impelentes y aspirantes de un aparato flotante; una reciprocidad completa entre las acciones de los émbolos líquidos en el aire motriz y el cabeceo del aparato; una elasticidad sin límites en todos los movimientos, que se regulan, se unifican y se completan mutuamente, aviniéndose a todas las irregularidades del oleaje, a todos los estados del mar y a la cantidad de energía que queramos recoger en un momento dado, siempre que ella esté por debajo del límite máximo con que nos brinda el estado del mar.

Notemos, pues, que la celda, ese órgano tan sencillo como elemental, al acoplarse con otras y reunir en condiciones adecuadas sus múltiples corrientes de aire, es la que produce los curiosos y útiles fenómenos que se refieren a la estabilidad de nuestros aparatos flotantes.

*Punto de apoyo.*—Queda por aclarar la segunda cuestión, la del punto de apoyo de la fuerza, y aunque ésta en rigor es inseparable de la anterior, y después

de lo que hemos visto puede ya no ofrecer duda; hemos creído preferible explicarla por separado, por ser la más importante objeción que contra aparatos flotantes y libres se ocurre presentar.

Ya dijimos que si no aumentamos la resistencia de los aeromotores, sino solamente el número al aumentar la potencia de las olas, la presión de la corriente de aire seguirá siendo la misma, y los émbolos líquidos tendrán mayor recorrido en las celdas. En este supuesto, las acciones aspirantes serán grandes, y como éstas las impelentes son fuerzas y movimientos de sentidos contrarios, las unas ejercerán de reacción de las otras, y la impulsión total quedará contrarrestada por las acciones aspirantes y por el peso y calado del aparato.

Pero vamos a suponer el peor de los casos: que aumentemos cuanto se pueda la presión del aire motor con lo cual, el émbolo líquido tendrá pequeño recorrido, la presión hacia arriba será la mayor posible y la aspiración será casi nula. ¿En este caso, cuál sería el esfuerzo máximo que debemos contrarrestar?

Ya lo sabemos: el esfuerzo medio de una ola hacia arriba es igual a la presión que daría una columna líquida de igual sección y de doble altura; pero como *por lo menos* la mitad de las celdas están con ola negativa o aspirante, nos resulta que el esfuerzo máximo hacia arriba podrá llegar, en el caso peor, cuando ningún trabajo aproveche el aparato, a la presión que daría una columna líquida de igual altura que la ola máxima y de sección igual a la superficie que ocupe toda la planta del aparato.

La reacción en sentido contrario la ejerce el peso del aparato y la presión atmosférica. Por cada metro cuadrado de superficie ocupada por las celdas, el volumen de aire motriz encerrado, es igual a tantos metros cúbicos como altura libre en metros lineales queda en las celdas, más uno, por el que hay en los conductos.

Si suponemos que el aparato está en el Mediterráneo sometido a un oleaje máximo de 4 metros, y con un calado de 2 metros, el esfuerzo medio total hacia arriba será, por cada metro cuadrado de superficie, de 4.000 kilogramos.

Siendo la altura que queda libre en las celdas de otros 2 metros, el volumen de aire encerrado por cada metro cuadrado sería de 3 m.<sup>3</sup>, los que sometidos al ~~esfuerzo~~ aspirante que ejercería en ellos la ascensión



del aparato con aquel esfuerzo contrario a la presión atmosférica se dilatarían  $3 \times \frac{4}{10} = 1,20$  m., cantidad

igual a la que disminuiría el calado, que al suponerlo de 2 m. resulta excesivo en 0,80 m. para dar a un aparato de las oscilaciones dichas la fijeza o reacción necesarias, en el peor supuesto, que es cuando no trabajase, cuando su peso fuera nulo y cuando los esfuerzos ascendentes fueran los mayores posibles.

La presión atmosférica es proporcional a la superficie ocupada por las celdas, como también lo es su fuerza contraria, la impulsación del oleaje.

El valor de la presión atmosférica es de 1.330 kg. por metro cuadrado, valor que está cerca del límite que podría alcanzar la impulsación hacia arriba de un gran oleaje en el Atlántico.

Luego la presión atmosférica es fuerza suficiente y adecuada para dar a los aparatos flotantes la fijeza, la reacción, el punto de apoyo para poder recibir los grandes esfuerzos de los mayores oleajes.

*Calado.*—Una nueva dificultad acude ahora a nuestra imaginación, y nos pone frente al siguiente dilema: si el calado del aparato es grande, las pequeñas olas no actuarán en él; y si es pequeño el calado, las olas grandes destrozarán el aparato.

Efectivamente, ambos extremos parecen ciertos; pero aun cuando lo fueran, goza nuestro aparato de una propiedad esencialísima que le permite dar solución a estas cuestiones de la manera más sencilla, puesto que a voluntad puede adquirir en tiempo brevísimo el calado que le convenga. Esta operación se verifica casi automáticamente: si abrimos una espita más o menos grande en el conducto general impelente, de modo que le hagamos comunicar con la atmósfera, habrá un escape de aire que hará disminuir, a voluntad, la masa del que está encerrado en celdas y conductos, y, en consecuencia, el aparato descenderá o, lo que es lo mismo, aumentará su calado; por el contrario, si abrimos una espita en la tubería aspirante, el aparato absorberá aire exterior, aumentará con ello el volumen del aire circulante y disminuirá el calado de las celdas. Se verifican estas operaciones en virtud de un trabajo mecánico que ejecutan directa y automáticamente las celdas, y que podemos regular a voluntad de tal modo, que si paramos los motores y abrimos las espitas aspirantes o las impelentes todo el trabajo del aparato

se transformará, en seguida, en elevación o descenso del mismo, respectivamente.

Expusimos antes que en un aparato cuyas celdas sean de 4 metros de altura, podríamos darles 2 metros de calado cuando la ola fuera de 4 metros; y aunque dijimos lo suficiente para que se pueda comprender la posibilidad de que esto, que a primera vista parece absurdo, se verifique sin detrimento para el buen funcionamiento del conjunto; parécenos muy dignas de llamar la atención las circunstancias a que son debidas tan importantes consecuencias.

En primer lugar, la libertad que tenemos de hacer trabajar a los aeromotores a la presión que queramos, dentro de los límites consabidos, nos permite también limitar a voluntad el recorrido de los émbolos líquidos, así es que aun cuando la ola exterior sea de 4 metros o más, podemos conseguir que la interior no alcance más que a 2, o a 1 o a menos; y en segundo lugar, si bien exteriormente no podemos impedir que las olas dominen con su altura al plano horizontal que limita las celdas y aun al que sirve del suelo a la cámara de motores, como en el exterior siguen lisos y verticales todos los paramentos desde la parte baja de las celdas hasta la cubierta, mientras consigamos que las olas no dominen a esta, no romperán ni alterarán su marcha, limitándose a dar a dichos paramentos la presión hidrostática debida a la altura de sus crestas. Luego no hay dificultad interior ni exterior que impida a las celdas tomar un calado que ponga sus válvulas por debajo del nivel de las crestas de las olas.

*Accidentes.*—Tres clases de accidentes parecen a primera vista posibles en los aparatos flotantes que venimos estudiando, y son: 1.º, los que pueden provenir de falsas maniobras; 2.º, roturas en las celdas o en el casco, y 3.º, rotura o garreo del amarre.

Los examinaremos por el orden que van anunciados.

*Falsas maniobras.*—Son variables en los aparatos la orientación y el calado.

*Orientación.*—La primera operación es completamente automática, se verifica sin intervención del piloto (llamémoslo así), y tal concepto no es maniobra; pero lo es en cuanto si proveemos al flotador de hélice impulsora, timón, áncoras y cables de amarre, el piloto puede modificar la orientación e impedir el automatismo de esta operación.

Que la orientación del aparato sea más o menos oblicua, con respecto a la dirección del viento y del



oleaje, nada implica para su buen funcionamiento; sólo influirá esto en la mayor tensión del cable de amarre. Cuando la posición del aparato sea completamente normal al oleaje, de modo que el mar le venga de lado, entonces será cuando habrá perturbaciones en la corriente motriz del aire; en efecto, se comprende que si todas las celdas del aparato reciben a un tiempo la acción de una ola positiva o la de una ola negativa no se establecerá la corriente motriz, o si existía se parará en el acto, pues la corriente motriz requiere la acción simultánea de olas ascendentes y descendentes. Aparte de esa paralización, el aparato no hará más que ascender o descender, siguiendo el movimiento único de toda la masa en que descansa. Luego, en el peor caso, cuando la orientación es la más defectuosa posible, se producen perturbaciones en el funcionamiento del aparato, pero no accidentes que comprometan su flotabilidad ni su solidez.

Ese defecto de orientación sólo puede suceder cuando la marejada no sea debida al viento reinante, y en ese caso el oleaje no es de lo más intenso, y el piloto puede maniobrar con facilidad para cambiar la orientación del aparato.

Cuando el oleaje es grande es siempre debido a la intensidad del viento, y entonces no hay caso, porque el aparato tomará rápidamente y por sí solo la dirección más conveniente.

*Calado.*—Las relativas al calado son casi las únicas y verdaderas maniobras que dependen de la voluntad del piloto; su objeto, como hemos visto, es conseguir que la parte inferior de las celdas permanezca siempre debajo del nivel de agua a fin de que la presión atmosférica, manifestándose por medio de la resistencia a la dilatación de ese aire encerrado, sirva de reacción a los esfuerzos de las olas positivas.

Ya dedujimos que el calado de dos metros era más que suficiente para el caso de un aparato corriente en el Mediterráneo con el máximo oleaje; luego aun cuando el calado deba ser directamente proporcional al tamaño de las olas, hay un límite que nos dice que las variaciones de calado no son de importancia. No es tampoco el calado una dimensión que requiera precisión y firmeza; lejos de eso, es posible que el calado mayor, y por consiguiente invariable, resulte en la práctica el más conveniente, pero siempre quedará gran utilidad a la maniobra voluntaria de elevar o sumergir el aparato.

Si con un oleaje pequeño tenemos el calado máximo, lo único que puede resultar es que el aparato no funcione debido a que la raíz de las olas quedase más alta que la boca de las celdas.

Si el oleaje es grande y tenemos el calado pequeño, entonces es cuando parece que pueden resultar perturbaciones; pero observemos lo que sucedería en el supuesto peor, cuando este oleaje viniera repentinamente y de sorpresa, la primera grande ola elevaría la proa de modo que las bocas del segundo grupo de celdas, en donde obraría la ola negativa, quedaría fuera del agua, y podría quizá llegarse a dar el caso de que el aparato quedase medio en el aire y descansar sobre las crestas de las grandes olas, como los tramos de largas celosías descansan sobre las pilas de un puente. No por eso dejarían de funcionar los motores; no por eso entrarían en función fuerzas perturbatrices o destructoras, lo que sucedería es que el aire sobrante sería rápidamente expulsado y automáticamente el aparato tomaría el calado necesario para funcionar sumergido en la cantidad conveniente.

Este sería el resultado del descuido que tuviese el piloto al no sumergir el aparato en cantidad suficiente cuando la gruesa mar se presentara repentinamente.

Si por una causa cualquiera se diera mucho calado y la presión del aire motriz no fuera suficientemente grande para contener a los émbolos líquidos antes de que tocasen a las válvulas, llegaríamos a tener, por los conductos de aire impelente, corrientes de agua que perturbarían el funcionamiento de los motores y producirían choques poco convenientes para la solidez de la obra. Y si aumentando esa inundación de los conductos quedase el aparato muy sumergido y sin funcionar, aún permanecería incólume la flotabilidad, puesto que el gran hueco de la cámara de motores y la situación alta de la misma dejarían al aparato en las condiciones de estabilidad de cualquier otro cuerpo cerrado por debajo y semisumergido con el metacentro por encima del centro de gravedad.

Tales serían las consecuencias de las falsas maniobras en el calado; pero hemos de observar que ni el aumento o disminución del oleaje vienen repentinamente, ni las maniobras han de exigir nunca rapidez y precisión en las manipulaciones del piloto y que, por consiguiente, para llegar al último extremo de los casos discutidos se requeriría voluntad de quererlo



hacer, en quien como en el piloto hemos de suponer el suficiente conocimiento de lo que maneja.

*Roturas en las celdas o en el casco.*—Este es el segundo de los casos de accidentes que debemos examinar.

Construido un aparato con las dimensiones, materiales y espesores que un detenido estudio determine, no es probable que sobrevenga una avería si una causa extraña no viene a producirla. Esas causas extrañas no son probables, no debemos ni preverlas, porque si no con mayor razón fuera preciso preocuparnos de hacer las casas incombustibles, o de ejecutar todas las construcciones a prueba de bomba o a prueba de terremotos.

Mas a pesar de todo, vamos a comprobar que puede venir esa causa exterior, un choque, por ejemplo, y producir gran desperfecto sin que el equilibrio se altere.

Ya hemos dicho que en todo aparato flotante habrá *por lo menos*, cuatro grupos de celdas que funcionan con sus respectivas corrientes completamente independientes, y también dijimos que se necesitan *por lo menos* tres para que la estabilidad subsista; luego si viene un choque y destroza una gran parte del aparato seguirá funcionando el resto, siempre que queden tres grupos de celdas intactos.

Si la avería fuera una grieta, un agujero, una rotura de motor, etc., resultaría un escape más o menos grande que afectaría a un solo grupo, y no atentaría, por tanto, a la estabilidad general, y que, además, podría combatirse abriendo la espita que compense la acción contraria del escape, si éste es en los conductos, o sujetando las válvulas correspondientes si se trata de una o varias celdas.

No teniendo que acorazar nuestros aparatos contra las fuerzas ajenas a ellos, su construcción podrá hacerse con materiales ligeros, porque si bien la diferencia de presiones, entre dos celdas distantes entre sí, puede ser grande, nunca será notable entre dos celdas consecutivas; y, además, porque la construcción tubular y celular dará al conjunto gran trabazón y resistencia con espesores pequeños de las partes constitutivas.

*Rotura o garreo del amarre.*—La boya del amarre ha de estar sólidamente cimentada para que en ella tengan un punto fijo y resistente el aparato y el cable que ha de llevar a tierra la corriente eléctrica.

Será tanto más seguro el anclaje de esa boya, en

cuanto al cable o cadena que una ambos extremos, podrá ser suficientemente largo para que su posición en tensión se acerque más a la horizontal que a la vertical.

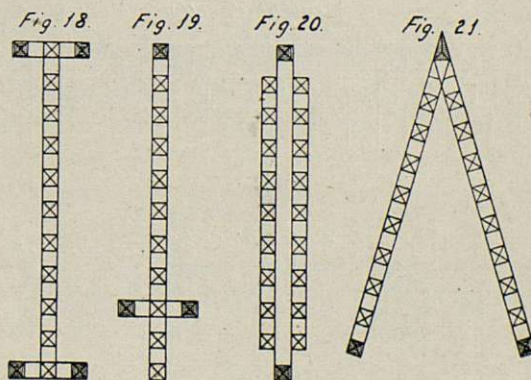
Para contrarrestar esa tensión, un aparato de grandes dimensiones podrá estar provisto de una hélice impulsora, movida por la corriente eléctrica que el mismo produce; y para prevenir una rotura de aquel cable será conveniente que los aparatos estén provistos de áncoras y cables que les permita aumentar los puntos de sujeción.

Basta con lo dicho para demostrar la posibilidad de un amarre sólido; y la seguridad de que aun cuando falle esa solidez, parece que hay medios de defenderse contra los impulsos de las corrientes marinas y aéreas que tiendan al transporte del aparato.

*Varias formas de aparatos.*—Conocidas las condiciones generales a que han de satisfacer los aparatos flotantes, cualquiera adivina que son muchas las formas que su planta puede afectar. La más sencilla y práctica parece ser la estrecha y larga con proa y popa, según hemos visto; pero en ocasiones puede convenir obtener con los aparatos flotantes otros resultados, ya sea, por ejemplo, disponer de una pequeña fuerza con un aparato escillo y transportable.

*Aparatos de reducidas dimensiones.*—Para aparatos pequeños en los que no será posible establecer los cuatro compartimientos, abarcando cada uno con su grupo de celdas varias clases, será forzoso basar la estabilidad en celdas especiales, que podríamos llamar estériles porque no están destinadas a recoger directamente la energía como lo hacen otras.

Las figuras 18, 19, 20 y 21 indican la forma general de las plantas para varios aparatos de esta clase. En ellas, los cuadros cruzados indican celdas activas, y





los rayados celdas inertes: la figura 18 tiene cuatro de éstas, la 19 tiene tres, la otra dos y la última tres.

Cada una de las celdas estériles tendrán una comunicación con la atmósfera por medio de una espita y un pequeño tubo que pasará a voluntad por un orificio con válvula aspirante, o por otro con válvula impelente, según se desee inyectar o expulsar aire para disminuir o aumentar el calado.

Las celdas motrices estarán unidas entre sí por medio de los dos conductos para el aire, o bien prescindirán del conducto aspirante como en los aparatos fijos en los casos representados por las figuras 18 y 19, si es que el volumen de las celdas estériles es suficiente para mantener a flote, a la altura conveniente, todo el aparato.

Si a estas celdas estériles de las figuras 18 y 19 se les da una longitud hacia abajo mayor que a las celdas motrices, conseguiremos elevar estos aparatos, siempre que convenga, sobre el nivel del agua, quedando apoyados sobre las tres o cuatro celdas estériles. Se comprende que para conseguir estos resultados no es indispensable que los aparatos sean pequeños, pues pueden obtenerse también con aparatos grandes de cualquier forma, siempre que la superficie de las celdas inertes esté en proporción con el peso del aparato y se encuentren repartidas de modo que ofrezcan segura base de sustentación.

Es también evidente que las celdas motrices representadas en las figuras 18 a 21 de sección cuadrada y separadas podrían ser rectangulares, circulares o de cualquier otra forma y estar contiguas. Es, sí, condición precisa que entre todas ellas abarquen, a lo menos, una ola completa, es decir, con sus porciones positiva y negativa.

Basado en las últimas consideraciones, presentamos

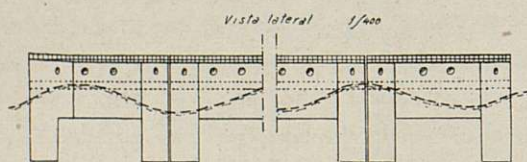


Fig. 22

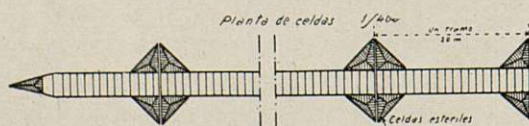


Fig. 23

en las figuras 22 y 23 otro esquema de modelo de aparato flotante de celdas contiguas, formando una sola línea y afectando más que los otros modelos la forma larga y estrecha, que tanto creemos conviene para la mejor acción del oleaje. Le dan apoyo varias celdas inertes convenientemente repartidas, y, en consecuencia, la corriente del aire motriz podrá reducirse a una sola, es decir, podrá formar un solo ciclo entre todas las celdas y los dos conductos.

Si construimos este aparato por medio de tramos iguales, conteniendo cada uno por lo menos cuatro celdas de apoyo, y de una longitud, por ejemplo, de 20 metros cada tramo, éstos podrán funcionar independientemente o uniéndose dos o más hasta un número  $n$ , siempre que la longitud del aparato que resulte no sea menor que la amplitud de las olas.

Las celdas de apoyo que en las figuras se presentan contiguas a las otras podrían también estar más apartadas a uno y otro lado, pero unidas al conjunto por medio de armazones rígidos. Su forma convendría estudiarla de manera que presenten la menor resistencia al viento, y su sección y longitud de modo que ofrezcan apoyo suficiente y sean capaces de mantener elevado el aparato.

La figura 24 representa un casco de buque aprove-

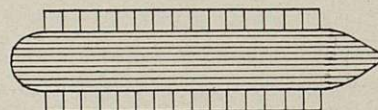


Fig. 24

chado para montar un aparato flotante, colocándole una fila de celdas contiguas a babor y otra a estribor. Los aeromotores podían situarse en la bodega, así como los motores y el lastre conveniente.

Finalmente, la figura 25 representa, también en pro-

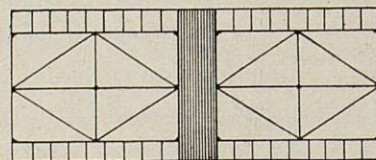


Fig. 25

yección horizontal, un aparato pequeño de cuatro grupos, que flotará por sí solo, sin flotadores especiales, descansando sobre el aire motriz como antes se dijo.



Tiene en el centro un puente donde colocar los motores y debería también estar anclado en roda.

## VII. REGULACIÓN DE LA ENERGÍA

Transformada la energía de las olas en electricidad, no es hoy cuestión que preocupe su conducción a tierra y su distribución y utilización, puesto que vemos ya muchos casos prácticos de aprovechamiento de grandes fuerzas hidráulicas que, convertidas en corriente eléctrica, son transportadas cientos de kilómetros y utilizadas para dar movimiento, luz y calor a establecimientos diseminados y a pueblos y ciudades diferentes.

Puede, sin embargo, preocuparnos todavía la irregularidad con que se nos proporciona la energía del oleaje, pues si bien hay medios prácticos para almacenar la fuerza, nunca se ha hecho, hasta ahora, con cantidades tan grandes como sería necesario para el caso que se propone.

No es, pues, ocasión de presentar una solución concreta y determinada para almacenar y regularizar la energía de las olas; todas las que conocemos tienen inconvenientes, pero todas pueden tener aplicación en casos determinados. La solución más conveniente de esperar es que llegue en cuanto se note su necesidad real. Esta es la ley de orden con que se suceden los inventos todos, y especialmente los que vienen a formar los eslabones del progreso material de la humanidad.

## VIII. CUESTIÓN ECONÓMICA

Es de todo punto imposible reunir todos los datos y poseer hoy los variados estudios que serían necesarios para deducir con exactitud el costo de instalación de un aparato con todos sus accesorios, así como el gasto que ha de producir su entretenimiento. Por tratarse de cuestiones tan nuevas, en las que ni por comparación pueden aplicarse datos positivamente prácticos, serían completamente hipotéticos los números que por cualquier concepto propusiéramos.

Las propiedades del eficaz y sencillo aparato descrito, revisten caracteres tan peculiares y de tan notoria novedad que son por sí solas la mejor garantía, así para la economía a que nos ha de resultar la unidad de energía como para la novedad de la patente que en ellas debe basarse.

Quizás pueda decirse que un motor marino requiere una solidez eventual superior a su potencia y que eso puede ser un perjuicio para que su economía exista, pero a eso cabe observar que tampoco los barcos pesqueros son capaces de capear el mar todos los días del año, y que consiguen, no obstante, extraer del mismo muchos millones de pesetas, y cuando no pueden actuar están en el puerto arreglando las redes. Nuestros aparatos flotantes también pueden batirse en retirada los días de temporal.

## E P Í L O G O

### RESUMEN

Mirando las olas oscilantes con los mismos prismas que pusieron ante nuestros ojos los sabios que las estudiaron, nos internamos en el mar, nos separamos de las barreras con que la tierra se opone a sus movimientos, y allí vimos siempre uniformes, siempre majestuosas, siempre en formación correcta y ordenada: ya no son para nosotros, fantasmas, indómitas, destructoras, insoportables, etc., etc.; son, sí, portadoras de energía, mensajeras de vida, ejércitos de la paz, cooperadoras pacientes del progreso industrial, que en balde claman siglos y siglos contra la inercia de la Humanidad; heroínas del trabajo, que lo aportan con constancia, orden y sumisión profunda, para entregarlo todo, y con su propia vida, en donde quiera que el hombre lo disponga.

¿No veis que esas olas que engullen al cobarde que apenas se aproxima a sus espumas son las mismas que mecen cariñosas al nadador valiente que corre por sus crestas?... Dejaos, pues, de temores y lanzaos már adentro. Allí las olas ni gritan ni destruyen; allí las olas están siempre dispuestas y sumisas a servir al hombre, según la Ley que del Creador recibieron.

En efecto, allí hemos visto, con los ojos del raciocinio, a esas olas silenciosas, pasando bajo las débiles celdas, respetando la estabilidad de un flotador con o sin base y depositando en él cuanto tenían, hasta quedar inertes.

En una pequeña atmósfera limitada y comprimida, dejan las olas su fuerza viva, como justa restitución, pues a impulsos del viento la debían; y ese aire, regulador y transmisor de todo movimiento y vida, es también allí transmisor único que comunica al mecanismo el movimiento circular continuo.



Las modificaciones que la práctica o la teoría sugieran para nuestro aparato, no pueden ya simplificar la forma de las celdas, ni su acoplamiento, ni su comunicación directa, ni el principio en que basamos su flotabilidad, ni su forma de orientación en roda, ni ninguna otra de las cuestiones esenciales que caracterizan a nuestros aparatos.

#### ANEJO NÚM. 1

COPIA DE LA PATENTE DE INVENCION NÚMERO 177.384, concedida el 3 de junio de 1947

a favor de

D. RAMÓN JIMENO CERNUDA, Ingeniero Industrial,

por:

«Procedimiento mecánico para el aprovechamiento de la energía de las olas con motor marino celular fijo o flotante».

#### MEMORIA DESCRIPTIVA

##### I.—Antecedentes.

Es objeto de la presente patente de invención, un nuevo procedimiento mecánico para el aprovechamiento de la energía de las olas oscilantes.

Llamamos olas oscilantes a la agitación que se produce en la superficie de las masas líquidas, como mares, lagos, etc., formando una serie de crestas y depresiones dotadas de aparente movimiento de traslación.

Las olas son efecto de la energía del viento que las produce derivada de la térmica solar. La velocidad de su transmisión está en función de la del viento. La energía de las olas es proporcional al cuadrado de la velocidad de propagación, según los tratadistas.

La teoría demuestra que el mayor esfuerzo lo verifican las olas en el sentido vertical; y que éste, en donde la profundidad es grande, alcanza al que produciría una carga estática representada por una ola de doble altura.

Con los innumerables sistemas de flotadores, paletas, arietes, sifones, diques, compuertas, etc., etc., propuestos hasta hoy para el aprovechamiento de la energía de las olas, sólo se ha tratado de obtener la que

resulta de los desniveles que se producen y la que se exterioriza en las rompientes; pero estos efectos o accidentes del oleaje no pueden darnos más que una muy pequeña parte de la energía que en sus movimientos casi verticales nos ofrecen esas grandes masas.

Lejos de las rompientes, esa energía se nos presenta espléndida, pero rodeada de obstáculos que se tienen por insuperables.

No hay, dicen, órganos adecuados para recoger esos empujes verticales tan variables; ni para reunir y transformar tan diversos movimientos.

Y agregan: sobre un medio tan movedizo, nunca podrá conseguirse la necesaria estabilidad, ni el indispensable punto de apoyo, sin el cual no hay energía posible.

Vistos los antecedentes, pasemos a la descripción del sistema con el que pretendemos ir hacia la resolución de tan interesantes cuestiones.

##### II.—Elemento «Celda».

Imaginemos un tubo de paredes delgadas, pero rígidas, de generatriz recta y vertical, de altura máxima como la de la mayor ola, en posición fija sobre las aguas y penetrando algo en ellas; este tubo, no siendo de pequeño diámetro, no opondrá obstáculo sensible al movimiento de las olas y vendrá a formar como la caja de un émbolo líquido.

Completemos dicha caja cerrándola por arriba, pero dejando en su parte alta dos aberturas con sendas válvulas que respectivamente se abran en sentidos opuestos comunicando con conductos distintos.

Este órgano mecánico representado esquemáticamente en la figura 1, constituye el *elemento simple* de nuestro sistema al que llamamos «Celda».

Su funcionamiento es bien sencillo: la masa líquida en movimiento comunicará su empuje vertical, por medio del émbolo líquido, al aire allí encerrado; y parte de éste saldrá a presión por el conducto impelente, para ser luego repuesto, al descender el émbolo, con aire aspirado por el otro conducto; y continuar así, a impulsos de las oscilaciones sucesivas del oleaje.

El resultado será que las olas oscilantes quedarán transformadas en dos corrientes de aire intermitentes, de sentidos contrarios. La transformación de éstas, en dos o en una sola corriente continua, así como su aplicación a dar movimiento a uno o a varios aeromo-



tores de cualquier clase, son simples cuestiones de mecánica práctica.

Sin embargo, vamos a presentar un ejemplo, si quiera sea muy esquemáticamente, por medio de la figura 4. En ella se observa que el aire comprimido que sale por la válvula impelente de la Celda se almacena en un gasómetro de fuelle a presión constante; pasa luego por un tubo, en el que actúa sobre un aeromotor, y llega a otro gasómetro de fuelle, en el que, por medio del correspondiente contrapeso, se mantiene una presión negativa constante; y de este depósito vuelve a la Celda, al verificarse la aspiración por la ola descendente. Para que el movimiento del aeromotor sea continuo, es necesario que el gasto de corriente aérea que en él actúe esté limitado a lo que el émbolo líquido dé por unidad de tiempo; lo que será fácil graduar, colocando en el motor un regulador de velocidad.

El emplazamiento, forma y dimensiones de una Celda, no ha de estar cohibido dentro de lo que para la claridad de la explicación hemos indicado; lejos de eso, debemos hacer constar que la Celda puede unirse a cualquier poste, armazón metálico, muro o roca fijos; así como a cualquier barco, flotador o sistema de flotadores; que la cámara podrá ser de cualquier forma, siempre que la boca inferior facilite la entrada del émbolo líquido en su movimiento vertical; que no es indispensable que esa boca de entrada quede siempre sumergida; que las válvulas de aire pueden ser más de dos, mientras cada una de ellas concurre a su respectivo conducto; que cabe también la supresión de uno de los conductos, el aspirante o el impelente, dejando sus correspondientes válvulas en comunicación con la atmósfera; y, en una palabra, que en la Celda hemos de ver, no la forma y dimensiones determinadas, sino la cámara que pueda cumplir, más o menos favorablemente, con la propiedades enunciadas.

### III.—Grupos de elementos celulares.

Varias o muchas Celdas, contiguas o separadas, pueden acoplarse, reuniendo en uno solo todos sus conductos impelentes, y en otro, todos los aspirantes. La figura 5 es un esquema del acoplamiento que indicamos, en la que no se trata de presentar la continuidad, la situación relativa, ni el número de las Celdas, sino solamente la manera cómo todas las válvulas impe-

lentes se reúnen en un solo conducto, y las de sentido contrario en otro; demostrándose la posibilidad de establecer el ciclo único y completo de la corriente, con el aeromotor en 1.

Con esa unión de Celdas, en las que siempre hemos de suponer que actúan a un mismo tiempo olas positivas y negativas, conseguiremos, no sólo que las acciones de todas se reúnan en una sola corriente, permitiendo sumar mayores cantidades de energía, sino que, además, esa masa flúida, dotada de gran elasticidad, sea, por sí sola, la que compense y regule todas las acciones irregulares que de los émbolos líquidos reciba.

Cualquiera que fuere el sistema del aeromotor (turbina, émbolo recto, molinete, hélice, etc.) de que nos sirvamos, es evidente que sobre él podrán actuar al mismo tiempo la impulsión y la aspiración de la corriente, respectivamente, por cada una de sus caras, formando un circuito cerrado para el aire transmisor; y se deduce fácilmente que el recorrido de los émbolos líquidos, para un mismo estado del mar, estará en razón inversa de la presión que ha de adquirir la masa aérea, o sea, de la resistencia del aeromotor; y que los émbolos líquidos trabajarán cuando suben, impeliendo al aire, y cuando bajan, aspirándolo por las respectivas válvulas.

Al variar la intensidad del oleaje, variará también, en cantidad y en intensidad, la corriente de aire que se produzca; y, con arreglo a estas variaciones, podremos poner en movimiento más o menos aeromotores, con más o menos resistencias útiles, cosas fáciles de combinar.

Regularizaremos así los motores todos, para funcionar a velocidades constantes con aire a mayor o menor presión; y la transmisión de la energía se conseguirá, cualquiera que sea el estado del oleaje, en la forma más conveniente para que nos produzca el mayor rendimiento posible.

Si el aparato de Celdas múltiples es flotante, o montado sobre flotadores cualesquiera, sus oscilaciones en nada perjudicarán al trabajo total, pues, mientras, en unas Celdas el movimiento de la caja y del émbolo serán en el mismo sentido y disminuirá con ello la carrera del émbolo, en otras, dichos elementos se moverán en sentidos contrarios, con lo que, según los casos, aumentarán la impulsión o la aspiración del émbolo, compensando las deficiencias del trabajo de los an-



teriores. Los émbolos líquidos actuarán de frenos para las oscilaciones del aparato.

La presión atmosférica, manifestada en las Celdas por las acciones aspirantes, junto con el peso del agua contenida en las Celdas, más el peso del aparato, sumarán una fuerza de reacción suficiente para contrarrestar las impulsiones de las olas ascendentes.

Todas las salvedades que hemos hecho con respecto a la cimentación, a la variedad de formas y a todo aquello que no es esencial en las instalaciones de la Celda única, son también de aplicación a las instalaciones de los Grupos de Celdas de que acabamos de hablar.

#### IV.—Aparatos.

Todo aparato de aplicación estará formado, o por una *Celda única*, o por un *Grupo de Celdas*, o por una *Reunión de esos Grupos*, constituyendo un solo conjunto rígido, fijo o flotante.

Aun cuando, con todo lo dicho, queda perfectamente determinado el objeto de la patente, vamos a presentar algunos dibujos, todos con carácter esquemático, acerca de los aparatos, con lo que complementaremos las ideas fundamentales expuestas.

La figura 6 representa la proyección vertical de un aparato fijo compuesto de un grupo de Celdas no contiguas, el cual tiene sus dos conductos de aire prolongados hasta tierra, en donde se suponen instalados los motores.

Las figuras 7 a 14 inclusives son distintos esquemas de vistas y secciones de un aparato fijo, de celdas múltiples, contiguas, en el que se presenta un conjunto general, que podría darse al armazón y cimentación 1, a las celdas 2, a los conductos de aire aspirante 3 e impelente 4, a la cámara de motores 5 y a la cubierta 6. Un aeromotor sistema Root, y dos dinamos acopladas a su eje, indican una de las tantas disposiciones que cabría adoptar para estos receptores de energía. Cada una de las figuras desarrolla lo siguiente:

- 7 = Vista del frente.
- 8 = Vista longitudinal.
- 9 = Planta de la cubierta.
- 10 = Planta de las celdas.
- 11 = Sección vertical longitudinal.
- 12 = Planta de los motores.

13 = Planta de los conductos.

14 = Sección vertical transversal.

Cabe el hacer fijo el aparato donde no se aprecie la marea.

La figura 18 representa la proyección horizontal de un aparato de igual forma que el anterior, pero flotante, apoyado en cuatro flotadores y amarrado a una boya anclada, lo que le permite a aquél girar en roda.

La figura 19 es la planta de otra disposición que imaginamos para un aparato semejante al anterior, de celdas contiguas o separadas, montado sobre tres flotadores.

La figura 20 indica, en proyección horizontal, una disposición de dos grupos de celdas, montados sobre dos flotadores.

La figura 21 es, en igual forma presentado, un aparato de dos grupos sobre tres flotadores.

La figura 24 presenta un casco de buque aprovechando con una fila de celdas contiguas a babor y otra a estribor.

Finalmente, la figura 25 representa, también en proyección horizontal, un aparato de cuatro grupos, que flotará por sí solo, sin flotadores especiales, descansando sobre el aire motor.

Aunque podríamos seguir presentando muchísimas otras formas y disposiciones de aparatos, creemos que basta con lo expuesto para dar idea general de los mismos; y como todos ellos se derivan del órgano fundamental, de ahí que nuestra patente pueda condensarse en dicho órgano elemental, al que hemos llamado *Celda*.

Las múltiples cuestiones que se relacionan con las dimensiones convenientes de cada una de las partes y del todo, con la resistencia de las mismas, con la elección de motores aerodinámicos, con la mejor combinación del conjunto, con la orientación de los aparatos flotantes, con su aplicación al aprovechamiento de las mareas por grandes celdas fijas, con las disposiciones de seguridad durante los mayores temporales, con la conducción de la energía a tierra, con sus aplicaciones prácticas y con tantísimas otras cuestiones inherentes a este nuevo sistema, ni deben ser objeto de esta Memoria, ni sería posible explicarlas en varios tomos; además de que, casi todos los problemas que deja planteados la construcción de nuestros aparatos, requieren el concurso de muchas personas



competentes y de muchos y costosos experimentos, para deducir las necesarias afirmaciones teórico-prácticas, afirmaciones que para nosotros serían ahora obra temeraria.

#### V.—Resumen retrospectivo.

El señor padre del peticionario, don EMILIANO JIMENO EGÚRBIDE, Ingeniero Industrial, por otros conceptos de respetada memoria, realizó hace años las primeras pruebas en la playa de Gavá (Barcelona), y sobre las notas que a nuestro requerimiento dejó escritas, colaborando en ellas con los diseños, y habiéndole secundado en visitas a diversas disposiciones marinas y en otras consultas a especialistas, hemos podido, continuando los estudios, llegar a la solución industrial que se presenta en esta patente.

#### NOTA.

Se reivindica como objeto de esta patente de invención:

1) Procedimiento mecánico para el aprovechamiento de la energía de las olas, que consiste en encauzar las aguas en sus movimientos de ascenso y de descenso, y hacerlas actuar, a manera de émbolo líquido, sobre una masa de aire cerrado, a la que comprime o dilata alternativamente, produciendo, mediante las válvulas adecuadas, la impulsión y aspiración que, convenientemente conducidas, forman las corrientes aéreas utilizables en aeromotores.

2) Procedimiento mecánico para el aprovechamiento de la energía de las olas según la reivindicación anterior, debiendo hacer especial mención de que el órgano elemental mecánico, con el que obtenemos dichos resultados, al que hemos llamado *Celda*, permite realizar acoplamiento o *Reunión de Celdas* para sumar grandes cantidades de energía, ya en una o ya en varias corrientes aéreas, y que pueden éstas actuar en cualquier caso en ciclo abierto o cerrado.

3) Procedimiento mecánico para el aprovechamiento de la energía de las olas con motor marino celular fijo o flotante.

Esta Memoria consta de nueve páginas escritas por una sola cara, y lo acompañan tres láminas con dieciocho figuras.

## ANEJO NÚM. 2

### ESTUDIO DEL TRABAJO DE LA "CELDA" COMO COMPRESOR DE AIRE, SU CONDUCCIÓN, MEDIDA, APROVECHAMIENTO Y EXPERIMENTOS

#### ORIENTACIÓN.

Escrita la descripción de la «Solución para el aprovechamiento industrial de la energía de las olas», en forma que interese a la cultura no especializada, vamos a intentar en el presente estudio profundizar la técnica del órgano esencial del sistema, al que llamamos «celda», desde el punto de vista de la compresión de aire y de las derivaciones que continúan el problema de su conducción, medida y aprovechamiento, planteando así las orientaciones para el programa de experimentos que podrían guiar los pasos del perfeccionamiento de la solución propuesta.

#### LEYES DE LOS GASES.

La celda, con el movimiento alternativo del agua que en su interior producen las masas de las sucesivas olas ondulantes, constituye un compresor de aire alternativo, de simple efecto, y de un solo proceso o monofásico.

Trabaja en la misma forma que el cilindro de una máquina de vapor, pero a la inversa; de ésta nace un esfuerzo; en el compresor hay que aplicarlo.

La compresión produce calor, y si no se elimina se calienta el aire.

Al expansionarse el aire se enfría.

El trabajo de compresión se utiliza, pues, en aumentar la presión y calentar, efecto este último que se elimina por irradiación, y al enfriarse pierde el aire presión. Para evitar esta pérdida de irradiación y su consecuencia, la disminución de presión se refrigeran los compresores de aire con camisas de circulación de agua que rodean los cilindros.

Nos detendremos en alguna breve exposición de principios, para llegar a conclusiones claras y bien cimentadas por analogía con los compresores.

*Compresión isotérmica*, es la realizada refrigerando a igual temperatura.

*Expansión isotérmica*, es la realizada calentando a igual temperatura.

La evolución isotérmica de los gases, y, por lo tan-



to, la del aire, que es una mezcla de ellos, obedece a la ley de Mariotte:  $v_1 p_1 = v_2 p_2 = K$  (constante), el producto de cada volumen por su presión correspondiente da siempre una relación constante, relación que nos permite, conocidos el volumen y presión primitiva del aire, para otro volumen posterior determinar la presión en él,

$$p_2 = \frac{v_1 p_1}{v_2} = \frac{K}{v_2}$$

y si conociésemos una presión intermedia cualquiera, análogamente calcularíamos el volumen del aire para esta otra presión.

Por otra parte, la llamada ley de Gay-Lussac, respecto a la mecánica de los gases, dice que, manteniéndose la presión constante, los volúmenes son proporcionales a sus temperaturas absolutas.

*Temperatura absoluta*, es la efectiva termométrica centigrada más 273 grados.

*Presión absoluta*, es la barométrica del lugar más la que se lee en el aparato de medida.

Sea  $v_1$  con temperatura y presión absolutas  $t_1 p_1$ , si se somete a  $p_2$  sin variar  $t_1$  adquirirá un volumen que llamaremos  $v'$ , y según la ley de Mariotte

$$v_1 p_1 = v' p_2 \quad (a)$$

Si  $v'$  con presión  $p_2$  lo calentamos a  $t_2$  pasará a ser  $v_2$ , y según la ley de Gay-Lussac podremos escribir

$$\frac{v'}{t_1} = \frac{v_2}{t_2} \quad (b)$$

Multiplicando ordenadamente (a) y (b) tendremos:

$$\frac{p_1 v_1 v'}{t_1} = \frac{p_2 v_2 v'}{t_2}$$

de donde

$$\frac{p_1 v_1}{t_1} = \frac{p_2 v_2}{t_2} = K \text{ (constante)} \quad (c)$$

Esto para la unidad de peso; si se tratase de varias unidades habría que dividir por su número, o sea por la masa o número de kilogramos.

*Volumen específico* es el volumen de la unidad de peso; se expresa en metros cúbicos, y la unidad de peso es el kilogramo.

*Peso específico*, es el peso de la unidad de volumen; se expresa en kilogramos y la unidad de volumen es el metro cúbico.

Apliquemos la fórmula (c) al aire.

Sea  $P$  = Presión absoluta en Kg. por  $m^2$ ,

»  $V$  = Volumen total en  $m^3$ ,

»  $m$  = La masa, o sea el peso del gas en kilogramos,

»  $T$  = Temperatura absoluta,

PV

tendremos, como en (c),  $\frac{PV}{mT} \times R$ , (d), de donde po-

dremos calcular la constante  $R$  para el aire.

El peso específico del aire  $e_0$  a  $0^\circ$  centígrados y presión de una atmósfera es  $1,293 \text{ Kg}/m^3$ .

1

El volumen específico del aire  $v_0$  será  $v_0 = \frac{1}{e_0} =$

$$= \frac{1}{1,293} = 0,773 \text{ m}^3/\text{Kg.}, \text{ y si } m = 1 = \text{la unidad de masa, o sea Kg., podemos sustituir en (d)}$$

$$R = \frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{10,330 \times 0,773}{0 + 273} = 29.27$$

constante para el aire.

En lo sucesivo se entenderán expresados en metros cúbicos.

Cuando se calcula la presión absoluta, hay que figurar la presión barométrica del lugar en las mismas unidades que su otro sumando, la manométrica.

Las presiones superiores a la atmosférica se miden con manómetros y se expresan en atmósferas, en Kg. por  $cm^2$  o por  $m^2$ , en mm. de mercurio o en m. de columna de agua.

La presión atmosférica normal es 760 mm. de mercurio =  $10,330 \text{ Kg. por } m^2 = 1,033 \text{ Kg. por } cm^2 = 10,33 \text{ m. de altura de agua.}$

1 mm. de mercurio = 13,60 mm. de agua de la misma sección.

1 mm. de agua = 0,074 mm. de mercurio de la misma sección.

Atmósferas  $\times 10,330 = \text{Kg. por } m^2$ .

Kilogramos en  $m^2$

$\frac{\text{Kilogramos en } m^2}{10,330} = \text{atmósferas.}$

10,330

Con esto tenemos los elementos para convertir unas expresiones en otras.

#### COMPRESIÓN Y EXPANSIÓN ISOTÉRMICA.

Es la realizada a igual temperatura. El aire de las celdas con la refrigeración constante del contacto del



agua de mar, a temperatura más baja que el aire, se acercará a la evolución isotérmica.

Tomemos los ejes cartesianos de presiones y volúmenes, clásicos para el estudio de los diagramas teóricos, que se comparan después con los diagramas reales que da el indicador en la técnica de los motores de cilindro y compresores.

La compresión y la expansión seguirán la curva que satisface la relación  $p \times v = K$  (constante), que es la hipérbola equilátera. Un mismo volumen de aire puede tener tantas curvas diferentes como distintas sean sus temperaturas iniciales, pero todas cumplirán la relación de aquella.

Algunos gases, y entre ellos el aire, no satisfacen plenamente a la ley de Mariotte,  $p \times v = K$ , la curva cae un poco más baja, pero la diferencia pequeña puede despreciarse para los efectos prácticos.

Véase figura 26.

El área AFOEA = BCODEB

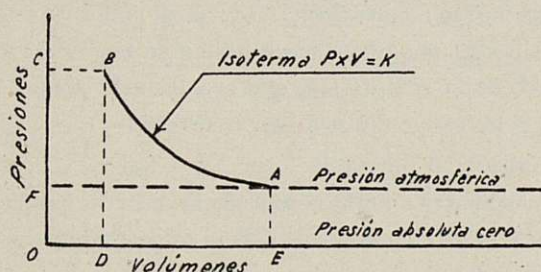


Fig. 26

La misma clase de curva es para la compresión que para la expansión, y si no ha habido pérdida de volumen, por cerrar las válvulas o suprimirlas, será idéntica la curva a la ida que a la vuelta del émbolo, y en nuestro caso a la subida que a la bajada de la ola.

#### COMPRESIÓN Y EXPANSIÓN ADIABÁTICA.

Es la que se efectúa sin pérdida de calor.

En la compresión adiabática aumenta más la presión por efecto de la mayor temperatura final. Puede haber para un mismo volumen tantas curvas como de diferentes temperaturas iniciales se parta, todas satisfarán la relación  $P \times V^n = K$  (constante).

El exponente  $n$  es:

$$n = \frac{\text{calor específico aire a presión constante}}{\text{calor específico aire a volumen constante}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{0,24 \text{ calorías}}{0,17 \text{ calorías}} = 1,41$$

En la práctica no se llega al caso teórico, se pierde algo de calor y el exponente alcanza un valor aproximado de 1,30.

**Calor específico de un cuerpo**, es la cantidad de calor para aumentar 1° de temperatura a 1 Kg. del mismo.

Si fuesen la compresión y la expansión adiabáticas seguirían curvas análogas; pero si no hubiese pérdida de volumen, por cerrar o suprimir las válvulas, sería exactamente la misma curva a la ida que a la vuelta del émbolo, y en nuestro caso a la subida que a la bajada de la ola.

Véase la figura 27.

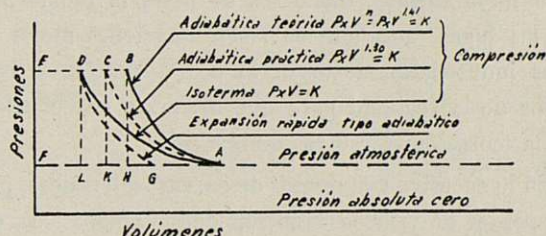


Fig. 27

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Trabajo de la expansión}}{\text{Trabajo de la compresión}} = \frac{\text{Área GDEFG}}{\text{Área ACEFA}}$$

Si fuese la compresión y la expansión teórica sin pérdida alguna de temperatura seguirían las relaciones de los volúmenes y las presiones siempre la curva AB, y de expansión la misma BA, y sería el rendimiento teórico perfecto.

De todo esto podemos ya sacar varias importantísimas consecuencias.

A medida que avanza la compresión y se separan las curvas adiabática e isotérmica, precisa aquella más trabajo, y da ésta, por lo tanto, mejor rendimiento, pues con menos trabajo llega a igual presión; por eso se refrigeran los cilindros de los compresores de aire con camisa de agua para mantener la temperatura del ambiente, requiriendo, cuando menos, 0,250 m³ por m³ de aire libre aspirado por minuto.

$$\begin{aligned} \text{Calorías a absorber} &= \\ &= \frac{\text{Trabajo para efectuar el cambio de volumen}}{427} = Q \times \alpha \end{aligned}$$

$Q$  =, volumen de agua de refrigeración,  $\alpha$  = lo que absorbe en calorías la unidad, pues el agua de 20° no conviene pase de 30°.

El aire del mar, de suyo fresco, en contacto en la







la expansión. Es de advertir que esta expansión rápida tiene tendencia a ser algo adiabática y que se enfríe el aire.

RENDIMIENTO DEL COMPRESOR.—*Trabajo de la compresión isotérmica monofásica.*

Sígase sobre la figura 29.

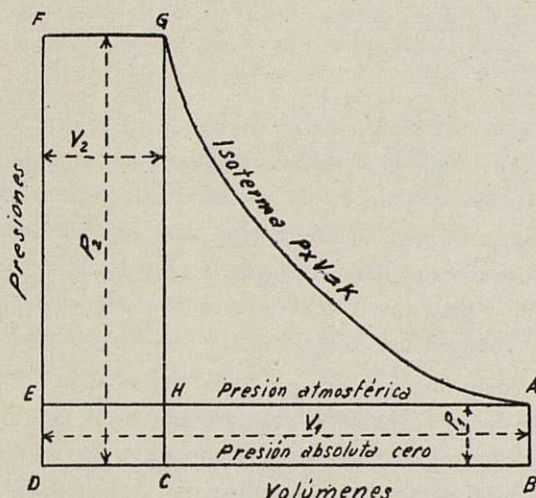


Fig. 29

Sea  $V_1$  el volumen de aire aspirado en el cilindro a la presión  $P_1$ , y  $V_2$  y  $P_2$  el volumen y presión finales después de concluir la compresión.

*Unidad de trabajo* es el kilogrammetro, que es el necesario para elevar un kilogramo a un metro de altura.

Por Termodinámica se sabe que el trabajo  $T$ , para efectuar el cambio de volumen, es la integral definida entre los límites  $V_1$  y  $V_2$  siguiente:

$$(a) \quad T = \int_{V_2}^{V_1} P \, dv$$

pero como  $P \times V = K$  (ley de Mariotte isotérmico)

resulta  $P = \frac{K}{V}$ , y sustituyendo en (a) y sacando la

constante fuera de la integral

$$(b) \quad T = K \int_{V_2}^{V_1} \frac{1}{V} \, dv$$

Si consideramos la función exponencial  $\varphi = e^x$  sabemos que en ella la magnitud es igual a su derivada, o sea que la derivada de  $e^x$  es ella misma  $e^x$ , y si tomamos la función logarítmica inversa de esa expo-

nencial  $y = \log. \text{hipo. } \varphi$ , su derivada será la inversa de aquella  $\frac{1}{e^x}$ , donde sustituyendo el valor (c) que-

dará  $\frac{1}{\varphi}$ , es decir, que la derivada de la función logarítmica será  $y' = \frac{1}{\varphi}$  y también  $D \log. \text{hip. } \varphi = \frac{1}{\varphi}$ , y aplicado a (b) tendremos  $D \log. \text{hip. } v = \frac{1}{v}$ , con lo que ya podremos integrarla entre los límites que la definen.

$$(c) \quad T = K \int_{V_2}^{V_1} \frac{1}{v} \, dv = K (\log. \text{hip. } V_1 - \log. \text{hip. } V_2) = K \log. \text{hip. } \frac{V_1}{V_2}$$

pero según la ley de Mariotte  $K = P_1 V_1$  y también

$P_1 V_1 = P_2 V_2$ , de donde  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1}$ , y sustituyendo

$$(d) \quad T = P_1 V_1 \log. \text{hip. } \frac{V_1}{V_2} = P_1 V_1 \log. \text{hip. } \frac{P_2}{P_1}$$

de manera que el trabajo es directamente proporcional al log. hip. del cociente de las presiones, pero notemos como curiosidad que si  $P_1 = 1$  como log. hip.  $1 = 0$  queda  $T = 1 \times V_1 \times \log. \text{hip. } P_2 = V_1 \times \log. \text{hip. } P_2$  y si además  $V_1 = 1$  sería  $T = \log. \text{hip. } P_2$ , es decir, que el trabajo es igual al área del segmento de hipérbola entre 1 y  $P_2$  que se expresa por el logaritmo hiperbólico de  $P_2$ , de manera que al integrar o hallar la superficie de un segmento limitado por la hipérbola cuya ecuación es de la forma  $\varphi y = K^2$  (\*), similar a la ley de Mariotte  $p v = K$ , aparecen los logaritmos hiperbólicos o neperianos que tienen por base la de la función exponencial. Cambiemos ese logaritmo hiperbólico en (d) por el vulgar de base 10, multiplicando por 2,3026, y abreviadamente por 2,30, y tendremos, ya más simplificada, la fórmula práctica:

$$T = 2,3 \times P_1 \times V_1 \log. \frac{P_2}{P_1} \text{ kilogrametros}$$

cuya representación gráfica es el área ABCGA.

Pero el trabajo total absorbido desde el comienzo de la compresión hasta la completa expulsión del aire comprimido será igual al trabajo  $T$ , más el trabajo

(\*) Referida a su centro y asíntotas.



de descarga, menos el que desarrolla por la otra cara del émbolo la presión atmosférica, que en las olas también existe. Por lo tanto, tenemos:

$$T_{\text{total}} = \text{área ABCGA} + \text{área GFDCG} - \text{área ABDEA}$$

es decir

$$T_{\text{total}} = 2,3 \times P_1 \times V_1 \times \log. \frac{P_2}{P_1} + P_2 \times V_2 - \\ - P_1 \times V_1 \text{ pero } P_2 V_2 = P_1 V_1$$

luego

$$(e) \quad T_{\text{compresión isotérmica total}} = 2,3 \times P_1 \times V_1 \times \log. \frac{P_2}{P_1} \text{ ki.}$$

$$\text{logrómetros} = 2,30 \times P_1 \times V_1 \log. \frac{V_1}{V_2} \text{ kilográmetros}$$

Hay que hacer figurar en esa fórmula las presiones y volúmenes de los productos  $P \times V$  en kilogramos por metro cuadrado y en metros cúbicos, respectivamente. En cuanto a las expresiones de los quebrados, pueden expresarse indistintamente en kilogramos por metro cuadrado o por centímetro cuadrado, o hasta en atmósferas, porque siendo las unidades del numerador y denominador iguales no altera el valor del cociente.

La presión atmosférica igual a 10330 Kg/m<sup>2</sup>, o sea 1 Kg/cm<sup>2</sup>.

Las presiones deben ser las absolutas, o sea sumando la atmosférica.

Esta fórmula (e) nos permite determinar el trabajo teórico máximo de una ola, operando con una celda de base conocida y para sencillez de la unidad 1 m<sup>2</sup> y altura proporcionada a la altura de la ola, suprimiendo las válvulas de impulsión y aspiración y colocando en la parte superior el empalme con un manómetro y válvula de seguridad. El aire se comprimirá y expansionará alternativamente sin sufrir pérdidas; determinaremos  $P_2$  por simple lectura en el manómetro de sensibilidad adecuada. La celda habrá que ir la sumergiendo, trabajando siempre, hasta alcanzar el máximo, o sea que todo el aire quede comprimido en el espacio libre, y que esta presión sea igual a la máxima de la ola a la que equilibre. La celda sumergida verticalmente la primera vez estará llena de aire a la presión atmosférica, y el volumen es conocido el de la celda, o sea, tendremos  $V_1$ ,  $P_1$  y  $P_2$ . El calado de la celda

deberá ser pequeño, para no crear dificultades a las olas.

Con esta misma celda de estudio y operando a distintas profundidades, podemos apreciar numéricamente para cada altura de ola hasta qué profundidad se aprecia masa de agua oscilante, y la progresiva disminución del empuje vertical. Así se verá si el empuje de la ola equivale aproximadamente a una masa estática de doble altura de la ola o si varía con el cubo de la altura de la ola, como afirman otros tratadistas.

También se pueden hacer ensayos para valorar con el mayor calado de la celda el perjuicio que se reporta a la transmisión de la ola oscilante, supuesta la celda llena a la presión atmosférica, para lo cual la celda precisará una llave para evacuación del exceso de presión o para inyectar el aire conveniente a la presión y volumen del ensayo.

La comprobación del perjuicio del espacio libre, de que luego se hablará, requiere una celda de ensayo con sus válvulas aspirante e impelente, con la cual puede medirse también el trabajo de la aspiración y de la impulsión separadamente, y ver si lo de cerrar el ciclo ahoga la impulsión por disminución del rendimiento volumétrico. Es importante demostrar que al parecer en la aspiración se da menos trabajo y no hay más que una masa de agua que cae por la gravedad, pero no los efectos del movimiento ondulatorio profundo del mar. Por otra parte, la aspiración no puede hacerse nada más que con aire a la presión atmosférica o poquísimo más, pues si pasase la presión de la altura de agua del calado de la celda se escaparía por abajo de la misma. La conveniencia de cerrar el ciclo de aire en los aparatos flotantes es para mejorar su flotabilidad, pero no lleva la codicia de utilizar la aspiración, lo que puede no compensarse los perjuicios del aprovechamiento mayor de la impulsión.

En esta fórmula (e) del trabajo total de la compresión, se ve cómo éste depende únicamente de la presión final, pero no de las situaciones intermedias, lo que nos evita el buscar las fórmulas de las coordenadas de la trocoide y apreciar en su derivada la velocidad del crecimiento del perfil de la ola y continuar por la segunda derivada con las aceleraciones de esta velocidad, pues nada de esto nos altera el trabajo total, que solamente depende de la presión final  $P_2$ .



### Trabajo de la expansión isotérmica monofásica.

Análogamente se deduciría que para la expansión la fórmula sería:

$$T_{\text{expansión isotérmica completa}} = 2,3 \times P_1 \times V_1 \log. \frac{P_1}{P_2} \text{ kilográmetros}$$

$$\text{grámetros} = 2,3 \times P_1 \times V_1 \log. \frac{V_2}{V_1} \text{ kilográmetros}$$

$V_1$  = Volumen inicial en  $m^3$  :  $V_2$  = Volumen final en  $m^3$

$P_1$  = Presión inicial en Kg. por  $m^2$  :  $P_2$  = Presión final en Kg. por  $m^2$

Lo que se consigna para que el estudio sea más completo.

### Comparación con la adiabática.

Experimentalmente se ha encontrado 1 caloría = 427 Kg/m.

$$1 \text{ Kg/m.} = 0,002342 \text{ calorías}$$

$$1 \text{ caballo vapor} = 75 \text{ Kg/m.} = 0,1758 \text{ calorías.}$$

Pues bien; si para llegar a una presión determinada una compresión isotérmica se requiere un trabajo equivalente a 67 calorías, la adiabática correspondiente requeriría 82,5 calorías, lo que acusa un exceso de 15,5 calorías, lo cual da una idea cuantitativa de la cuestión.

El rendimiento en la compresión monofásica disminuye a medida que aumenta la presión, como ya se dijo antes.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Trabajo creado}}{\text{Trabajo absorbido}}$$

La proporción para 2, 3, 4 y 6 atmósferas es, respectivamente, 83,5 75,1, 69,3 y 62,7 %.

**Espacio libre**, es el que resta entre el émbolo y la tapa del cilindro al final de la carrera.

El aire que allí queda comprimido ayuda con su expansión, en el compresor mecánico, al cambio de sentido del émbolo.

Inconvenientes. El aire comprimido mientras se expande tiene presión superior a la atmosférica, y hasta que alcanza ésta, impide la aspiración, con lo que reduce el efecto útil del émbolo y disminuye el rendimiento volumétrico del compresor a medida que él aumenta; por eso en los compresores de aire alter-

nativos se deja el espacio libre pequeño de 1 a 5 %, y a veces alcanza el 10 %.

Véase la figura 30.

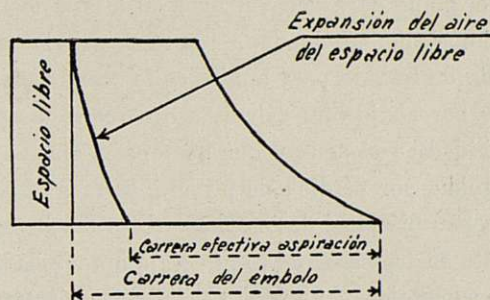


Fig. 30

En la celda es necesario que quede espacio libre para que su aire sirva de colchón que evite el posible golpe de ariete de la masa ascendente de la ola al comprimir el agua si llenase ésta completamente a aquélla. Cuando la celda es fija, caso posible en mares sin marea sensible, su altura deberá estar calculada para un oleaje medio y con espacio libre suficiente que no podrá aquilatarse tanto como en un compresor de aire de cilindro, y deberá ser más holgado. Si las olas fuesen menores aumentaría el espacio libre ocasionado a la débil fuerza naturalmente aún peor rendimiento. Al aumentar el oleaje cabría dominar el curso ascendente de la ola, aumentando proporcionalmente la presión de trabajo, graduando los muelles de las válvulas, con lo que se conservaría siempre el espacio libre conveniente. En la celda flotante hay un recurso más para dosificar el espacio libre, y es variar el calado.

Como se vió que el trabajo en la celda comprimida es función del logaritmo de la presión final que crece con ésta, será independiente de la forma de la celda, y por eso se le dieron en principio las paredes verticales, que es lo más constructivo y sencillo. Ahora bien, el émbolo líquido es deformable, y para disminuir el espacio libre y obtener mayor  $P_2$ , puede darse a la celda en su parte superior forma hemisférica, cónica, piramidal, etc., lo que comprobará la experiencia. A esta preocupación se debe la general redacción de la primera reivindicación de la patente de invención que resume el motor marino celular.

Siendo  $v_1 p_1 = v_2 p_2$ , resulta  $p_2 = \frac{v_1 p_1}{v_2}$ , y la disminución del espacio libre hace disminuir proporcio-



nalmente más a  $v_2$  que a  $v_1$ , con lo que aumentará  $p_2$  su logaritmo y, por lo tanto, el trabajo total T.

Para que quede siempre algo de aire en la celda que evite el golpe de ariete del agua al cierre de la válvula impelente, graduada a resortes para la presión deseada de trabajo para el aire en los conductos, cabe añadir por abajo otra válvula a esa que se cierre por flotabilidad en el agua y que no precisa ajustar, pues en seguida, por pérdida de presión, cerrará la válvula de resortes principal de impulsión. Esto puede ser conveniente en los casos de gran oleaje aprovechado con celdas sumergidas de menor altura. Esta orientación la facilita el que el agua sube en las celdas bastante ordenadamente, como puede inspeccionarse si se penetra nadando en una de ellas provisto de las gafas y tubo respiratorio, prolongado al exterior, que se utiliza para el deporte de la pesca submarina; no hay que permanecer mucho rato, pues los cambios alternativos de presión, si son pronunciados, pueden producir molestias auditivas en los tímpanos.

#### CÁLCULO DE LA POTENCIA DE UN COMPRESOR MECÁNICO.

Puede estimarse la potencia teórica, indicada y efectiva.

*Teórica.*—Se divide el número de Kg. m/minuto que se obtiene de la expresión teórica del trabajo por  $75 \times 60 = 4.500$ , que son los Kg. m/minuto de un caballo de vapor.

$$\frac{\text{Trabajo compresión isotérmica total}^{\text{m}}}{4.500} = \text{Caballos vapor teóricos.}$$

Para las celdas puede producirse análogamente.

*Indicada.*—Hay que conocer la presión media efectiva en Kg./m<sup>2</sup> que se desarrolla en la compresión, lo que se deduce del diagrama que se obtiene de un aparato indicador. El trabajo está representado por una superficie cuyas ordenadas son presiones, y cuyas abscisas son volúmenes, y si dividimos esa superficie por la longitud total tendremos la altura media, que también hay una fórmula para deducirla en función de las presiones inicial y final. Después se sigue así:

$$\begin{aligned} \text{Caballos vapor indicados} &= \frac{\text{Trabajo indicado minuto}}{4.500} = \\ &= \frac{P_m \times \text{volumen desplazado minuto}}{4.500} = \frac{P_m \times S \times L \times N}{4.500} \end{aligned}$$

Siendo:  $P_m$  = Presión media de una embolada en Kg. por m<sup>2</sup>.

$S$  = Superficie del émbolo en m<sup>2</sup>.

$L$  = Carrera del émbolo en metros. (Se toma  $2L$  si fuese de doble efecto, que no es el caso del mar.)

$N$  = Número de revoluciones por minuto. (Número de emboladas o número de olas.)

Para la celda puede deducirse de la misma manera.

*Efectiva.*—Conocida la potencia indicada, no hay nada más que multiplicarla por el rendimiento mecánico, de que se habla en seguida, para tener la potencia efectiva.

En la celda cabe seguir idéntico camino.

#### RENDIMIENTO DE LOS COMPRESORES MECÁNICOS.

Puede ser volumétrico, de compresión, mecánico y total.

*Volumétrico.*

El

$$R_v = \frac{\text{Capacidad}}{\text{Desplazamiento}}$$

La capacidad es el volumen de aire libre que equivale al comprimido descargado por minuto, se busca

$$\text{la equivalencia por } \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}, \text{ el descargado}$$

se mide llenando un depósito.

$$\begin{aligned} \text{Desplazamiento} &= \text{Volumen engendrado por el área del} \\ \text{émbolo} &= \frac{(\text{Área del émbolo} - \text{área del vástago}) +}{2} \end{aligned}$$

$$\frac{+ \text{área del émbolo}}{2} \times \text{carrera} \times \text{número revoluciones por minuto}$$

Se tomaría la carrera doble si fuera de doble efecto.

Esta relación no parece posible aplicar a la celda, pues la ola no permite el cálculo exacto que antecede, pero sí aproximado.

*Compresión.*

$$R_c = \frac{\text{Trabajo isotérmico}}{\text{Trabajo indicado}} = \frac{2,30 \times P_1 \times V_1 \text{ por log. } \frac{P_2}{P_1}}{P_m \times S \times L \times N}$$

se tomaría la carrera doble si fuera de doble efecto.



El significado de las letras y origen de las fórmulas se expresó antes.

En la celda cabe seguir análogo procedimiento.

*Mecánico.*

$$R_m = \frac{\frac{T_{\text{indicado}}}{4.500}}{\frac{T_{\text{efectivo}}}{4.500}} = \frac{\text{Caballos vapor indicados en la compresión}}{\text{Caballos vapor efectivos en el árbol del motor}}$$

En la celda habría que hacer intervenir el trabajo teórico máximo de la ola.

*Total.*—Es el que más interesa.

$$\text{Rendimiento total} = \frac{\text{Trabajo isotérmico}}{\text{Trabajo efectivo}}$$

pero

$$\text{Trabajo isotérmico} = \text{Rendimiento compresión} \times \text{Trabajo indicado}$$

$$\text{Trabajo efectivo} = \frac{\text{Trabajo indicado}}{\text{Rendimiento mecánico}}$$

sustituyendo

$$R_{\text{total}} = \frac{R_c \times T_{\text{in}}}{T_{\text{in}}} = \frac{R_c \times T_{\text{in}} \times R_m}{T_{\text{in}}} =$$

$$= \text{Rendimiento compresión} \times \text{Rendimiento mecánico}$$

Deducidos los anteriores cabe también aplicar este camino para la celda, pero como la fuerza de las olas es abundante y barata, tienen relativa importancia algunas de esas cifras.

#### DIAGRAMAS Y SU INTERPRETACIÓN.

Los diagramas obtenidos registrando todas las fases de un compresor son indispensables para conocer el funcionamiento del mismo (fig. 31).

Eje OY de presiones manométricas que se toman desde la presión atmosférica. Eje OX de volúmenes, que si fuese el émbolo de la unidad de superficie serían la carrera misma, y no siéndolo serán proporcionales a ella.

La línea AB corresponde a la aspiración y debe coincidir con la presión atmosférica en un compresor bien equilibrado.

Al término de la aspiración comienza la compresión BC, según la ley que corresponda.

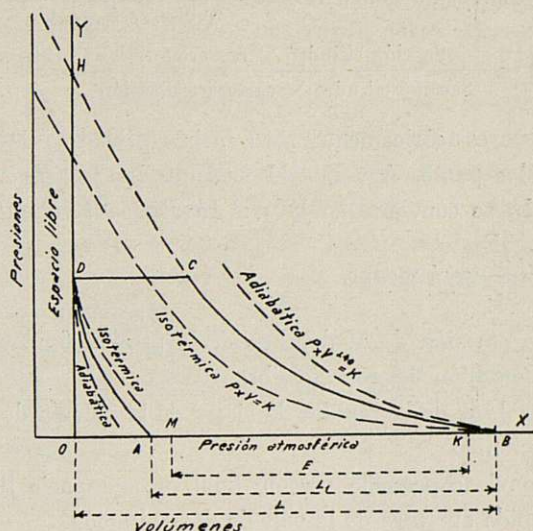


Fig 31

Cuando alcanza la presión la altura final comienza la descarga CD.

Después tiene lugar la expansión del aire comprimido contenido en el espacio libre según DA, según su ley, y cuando concluye en A principia la aspiración que termina en B, para repetir el ciclo indefinidamente.

Las válvulas no actúan indistintamente y, por lo tanto, se altera el diagrama teórico, reduciéndose con esto, muchas veces, la aspiración de M a K, por ejemplo.

Si la línea de aspiración cae por bajo de la presión atmosférica, es señal de que hay algún obstáculo que priva la entrada del aire, tubo obstruido o válvula insuficiente. En un compresor implica eso un gasto de fuerza, cuyo consumo es directamente proporcional a la superficie del diagrama; al descender la línea de aspiración, aumenta el área. En la celda marina hay una merma volumétrica.

Después del comienzo de la aspiración teórica, comienza el momento efectivo de la apertura de la válvula de aspiración.

Después del comienzo de la compresión teórica, comienza el momento efectivo por cierre de la válvula de aspiración.

Después del comienzo de la descarga teórica, co-



mienza el momento efectivo por la apertura de la válvula de impulsión.

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento volumétrico} &= \frac{\text{Volumen desplazado}}{\text{Volumen aspirado}} = \\ &= \frac{\text{Sección cilindro} \times \text{carrera total}}{\text{Sección cilindro} \times \text{carrera aspiración}} = \frac{L_1}{L} \end{aligned}$$

Esto es teóricamente, pero en la realidad se desplazan los puntos A y B a M y K que les sustituyen, y así  $L_1$  se convierte en E y el rendimiento volumétrico = — será menor.

E

L

La posición de M depende de la presión final y de la dimensión del espacio libre.

La de K de la rapidez de cierre de la válvula de aspiración.

Conviene pequeña presión final, poco espacio libre y rápida apertura de la válvula de aspiración.

Las compresiones monofásicas tienden a la adiabática y no a la isotérmica, que es la más favorable.

En el mar ya dijimos que sería muy isotérmica la compresión en la celda, por la refrigeración del agua, y que se podía actuar a baja presión, menor que la actual industrial, pues no hay la transmisión a distancia que obliga a economizar sección de tuberías, elevando la presión del aire.

Examinada la misma figura 31 se observa que lo prodebe tener, es que hay fugas en el émbolo y en las válvulas, pero principalmente en las últimas. En la celda no son posibles los escapes en el émbolo, salvo que la celda esté deteriorada; el funcionamiento de las válvulas es lo que hay que vigilar.

Examinada la misma figura 31 se observa que la prolongación de la curva de compresión corta en H al eje de las Y, y esto significa que, en la práctica como en la teoría, la compresión tiene un límite, al llegar al cual el rendimiento sería 0, es decir, no proporcionaría ninguna cantidad de aire comprimido, pues comprimiría sin descargar, y de vuelta el émbolo expansionaría sin aspirar. La situación de este punto H depende del espacio libre y temperatura; cuanto menor sea aquél y mayor la refrigeración, más elevada podrá ser la compresión monofásica.

La línea CD de descarga del aire comprimido está influida por la insuficiente sección de las válvulas de descarga, tamaño y situación del depósito regulador del aire, disposición de las tuberías y otras resis-

tencias de los órganos de salida, como llaves, etc. La presión final se medirá exactamente en el depósito del aire, pues los diagramas registran una presión mayor, ya que el indicador no sufre las resistencias que se oponen al paso del aire más allá de las válvulas, en el curso de las tuberías, y que no deben considerarse como inherentes al compresor o celda. Quizás no se precise depósito de aire regulador y lo supla el volumen mismo de los amplios conductos de circulación del aire.

La curva DA de la expansión del aire del espacio libre comienza cuando el émbolo llega al final de la carrera, o sea después de descargar el aire comprimido. En un compresor ese aire se expansiona y se aprovecha como fuerza motriz, pues al empujar al émbolo favorece la carrera de vuelta, y disminuye la superficie del diagrama al recortarlo, pero perjudica al rendimiento volumétrico. En la celda marina esta expansión es pura pérdida, pues aunque se cierre el ciclo del aire se aprovechará la aspiración, pero nunca la evolución interna de la celda a válvula cerrada. Por eso la disminución del espacio libre es de la mayor trascendencia para el rendimiento de la celda.

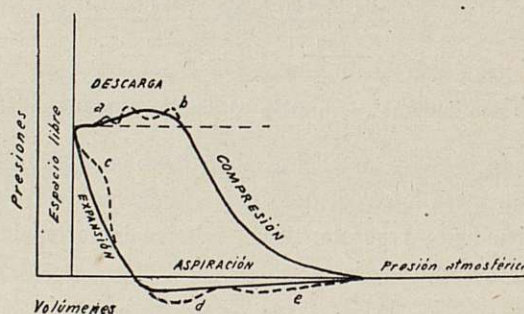


Fig. 32

La figura 32, en trazo seguido, presenta el diagrama real de una buena compresión monofásica. La aspiración, si bien baja de la presión atmosférica, al menos coincide al final. La compresión entre adiabática e isotérmica estará más cerca de la segunda.

Los defectos posibles se indican de puntos y se describen a continuación:

$\alpha$  = la apertura de la válvula de descarga hace subir y a veces oscilar la curva; esto es debido a la inercia de la válvula, que si abre rápidamente las oscilaciones son débiles; si el descenso es seguido, pero



lento, indica válvula pequeña o tubo estrecho de descarga.

*b* = válvula de descarga abre con retraso, aflojar los muelles.

*c* = concavidad, cierre perezoso de la válvula de descarga y retroceso de aire comprimido.

*d* = resistencia a abrir la válvula, muelles demasiado tensos.

*e* = válvulas pequeñas, obstrucción tuberías, demasiado largas las tuberías, demasiados codos o éstos excesivamente agudos.

Si las válvulas tienen los muelles algo flojos se suele oír un chirrido cuando están cerradas, debido a los escapes de aire. Es difícil conseguir que los muelles tengan la tensión debida, y hay que efectuar varios tanteos.

Las fugas de las válvulas de aspiración son también motivo para que la curva de compresión se aproxime a la isotérmica. Asimismo pueden motivar que la curva de expansión descienda con mayor rapidez de la debida, haciendo que aparezca con una mayor aspiración.

A veces los muelles de los indicadores que toman los diagramas son demasiado rígidos para obtener un trazo exacto de la aspiración y hay que hacerlo con uno especial que responda a 0,5 Kg. por cm<sup>2</sup> o menos. Se utilizan los mismos indicadores que para las máquinas de vapor.

#### ÍNDICE DE COMPRESIÓN.

Determinación de si es más o menos adiabática o isotérmica, lo que se conoce si se calcula el exponente *n* de  $P \times V^n = K$ .

En un diagrama señalemos dos puntos distantes en la línea de compresión, determinemos los volúmenes  $V_1$  y  $V_2$  y, sabida la presión de descarga para deducir la escala, midamos  $P_1$  y  $P_2$ .

Se puede escribir

$$P_1 \times V_1^n = P_2 \times V_2^n$$

tomando logaritmos

$$\log. P_1 + n \log. V_1 = \log. P_2 + n \log. V_2$$

de donde

$$n (\log. V_1 - \log. V_2) = \log. P_2 - \log. P_1$$

y

$$n = \frac{\log. P_2 - \log. P_1}{\log. V_1 - \log. V_2}$$

si  $n = 1$  es la isotérmica, si  $n = 1,42$  es la adiabática teórica.

*Cálculo de la presión media efectiva.*—Lo que antes era indicado a deducir por cálculo puede hacerse con un diagrama y un planímetro, y dividiendo la superficie por la carrera del émbolo, se tendrá la presión media a multiplicar por la escala de presiones.

La superficie puede deducirse dividiendo por ordenadas equidistantes el diagrama, hallar la semisuma de las ordenadas, sumar las alturas medias y dividiendo por su número. Se multiplica después por la escala de presiones.

El aire adiabático se expansiona menos que el vapor isotérmico en igualdad de condiciones.

#### RESUMEN.

La celda es un compresor de aire, y éste es como la manivela y biela que lo relacionan con el aeromotor que es el volante. El agua de la ola es el vapor o fuerza motriz. El émbolo es la superficie del agua en contacto con el aire de la celda.

El diagrama completo de la celda que comprenda, como en una máquina de vapor, el ciclo total de la compresión, la descarga, la expansión del aire restante en el espacio libre y la aspiración a la presión atmosférica, no interesa para la ola, pues representa la diferencia entre lo que recibimos y devolvemos a la ola, pero no lo que podemos aprovechar de ésta.

El rendimiento en trabajo no lo puede proporcionar ni la compresión, ni la expansión, pues son evoluciones internas a válvulas cerradas que no influyen en el aeromotor.

El trabajo lo proporciona la presión de trabajo por el recorrido (volumen) de descarga, y la depresión de aspiración, si se produce, por el recorrido (volumen) de aspiración en la parte que fuere. Esta segunda es despreciable al lado de la primera, a la que no conviene perjudicar con pérdida volumétrica del aire de la aspiración dificultada por un aprovechamiento. Solamente, parece, que convendrá usarla para cerrar el ciclo en los aparatos flotantes. También se podría utilizar únicamente la aspiración, o bien en unas celdas la compresión y en otras la aspiración. Requiere el opinar una serie de experimentos bien vigilados.

El aire comprimido en el espacio libre es pura pérdida, que se disminuye con la reducción del espacio libre y con actuar a presión baja de trabajo, lo que



aumentará el recorrido interno de la ola en la celda sin variar el trabajo. Para reducir el espacio libre la parte superior de la celda puede ser hemiesférica, troncocónica, piramidal, etc.

En la aspiración la ola cae muerta, como si la gravedad se encargase de volver las masas a su sitio, sin notarse en los experimentos la viveza de la compresión y descarga. Es algo así como si la ola fuese parecida al remar, con un movimiento activo y otro de preparación a tomar posiciones.

La masa oscilante de agua no es sólo la que se ve, se continúan los efectos en profundidad hasta un cierto límite, según la altura de la ola. El trabajo de una ola puede ser que aumente con el doble de la altura, como dicen algunos autores, pero podría ser que la potencia, al dividir por el tiempo, siguiese una ley más creciente, pues las olas de 0,50, 1, 2, 3, 4 m. de altura, tienen de período 4, 5, 6, 7, 8 segundos, respectivamente, creciendo más la ola que el período.

A «grosso modo», si un 25 % de la ola se pierde en la compresión y otro 25 % en el espacio libre, utilizaríamos el 50 % y al disminuir de ello otro 25 % de pérdidas de todas clases, aprovecharíamos en realidad el 25 % restante final.

#### TRANSMISIÓN DE AIRE COMPRIMIDO.

Las conducciones serán de secciones que produzcan pérdidas de presión soportables económicamente.

Convendrán juntas de goma o amianto, para evitar las fugas.

Las tuberías serán descubiertas, pero, si es aire húmedo el que circula, pueden dar condensaciones que al helarse, si la temperatura baja de 0°, producen obstrucciones difíciles de localizar.

Conviene declive, depósitos de reunión y llaves de purga para eliminar las condensaciones.

Los depósitos de aire regularizan, condensan humedad y deben llevar llaves de purga, manómetro, válvula de seguridad y puerta registro.

Su volumen V en instalaciones pequeñas:

$$V = \sqrt[3]{5 \times \text{Volumen m}^3 \text{ aspirados por minuto}}$$

y en instalaciones importantes:

$$V = \sqrt[3]{\text{Volumen aspirado por hora}}$$

Se regulariza interrumpiendo la marcha del compresor que da siempre pulsación.

Quizás sean innecesarios si se suplen con amplios conductos de circulación del aire.

Fugas de aire, ascienden a 5 % en buenas instalaciones, y a 50 % en las malas.

Para corregirlas hay que revisar constantemente.

Se localizan y aprecia su importancia, llenando las tuberías por tramos y viendo el tiempo que tarda a bajar la presión.

Se valoran si en el caso anterior se sabe el volumen y ver lo que baja en 5 minutos. Con un cálculo sencillo se traduce la pérdida manométrica a aire libre por minuto. También se valoran si conociendo la marcha volumétrica del compresor se acopla para mantener la presión.

Se acusan las fugas por un silbido, y las pequeñas se descubren con agua jabonosa en las juntas.

En las instalaciones importantes conviene tener aparatos que registren la cantidad de aire, uno al arranque y otro al final; por diferencia se deducen las fugas.

#### Pérdida de presión por rozamiento.

El rozamiento del aire a su paso por las tuberías ocasiona una pérdida de presión, y la magnitud depende de la extensión del recorrido. Se calcula esta pérdida por la fórmula de D'Arcy:

$$p = \frac{2}{d} \times l \times \delta \times \alpha \times v^2 \quad (a)$$

En ella:

$p$  = pérdida de presión manométrica en Kgs. por metro cuadrado.

$d$  = diámetro de la tubería en metros.

$l$  = longitud de la tubería en metros.

$\delta$  = peso específico del aire comprimido a la temperatura y presión manométrica que tenga. Peso en Kg. de 1 m<sup>3</sup>.

$\alpha$  = coeficiente variable con el diámetro e igual a

$$0,000507 + \frac{0,00001294}{d}$$

$v$  = velocidad del aire en metros por segundo.

Llamando  $q$  a la cantidad de aire comprimido en metros cúbicos que circula por segundo y teniendo en cuenta que

$$q = v \times \text{sección} = v \times \frac{\pi d^2}{4} \quad v = \frac{q}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad v = \frac{q^2}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)^2}$$



sustituyendo (a)

$$p = \frac{2}{d} \times l \times \delta \times \alpha \times \frac{q^2}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)^2} = \frac{2}{d} \times l \times \delta \times \alpha \times \frac{16 q^2}{9,86 \times d^4} = \frac{32}{9,86} \times l \times \delta \times \alpha \times \frac{q^2}{d^5} = 3,25 \times \alpha \times \frac{q^2 \times l \times \delta}{d^5}$$

Las relaciones más interesantes son las siguientes:

- la pérdida de presión es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad, pues  $q^2 = v^2 \times \text{sección}^2$ , y la sección es constante en toda la longitud.
- la pérdida de presión es directamente proporcional al cuadrado de la cantidad de aire.
- la pérdida de presión es inversamente proporcional a la quinta potencia del diámetro para una cantidad dada de aire.

Si para un volumen y longitud dados se quiere reducir la pérdida de presión, hay que utilizar velocidades más reducidas, lo que se logra con secciones mayores.

En los tratados de esta materia se encuentran tablas calculadas para los distintos diámetros con los valores  $\alpha$ ,  $d^5$  y  $\frac{\alpha}{d^5}$ , así como tablas a doble entrada se-

gún presión y temperatura para  $\delta$ , peso específico del aire. Hay también cuadros gráficos para hallar el diámetro de una tubería que son desarrollos de la fórmula de D'Arcy.

#### Velocidad del aire.

Se considera que no debe exceder de 5 a 8 m. por segundo comparativamente apreciado respecto a otros casos industriales.

Para hacer patentes los efectos de varias velocidades se pone un ejemplo:

Tubería de 1.000 m. de 0,30 m. de diámetro con velocidad de 8 m/s. pierde 1,5 %.

Idem íd. íd. 15 íd. 6 %.

Idem íd. íd. 30 íd. 24 %.

#### Efectos de las curvas y válvulas.

Aumentan los rozamientos y las pérdidas son menores con los ángulos de mayor abertura.

Se substituyen en el cálculo de las tuberías por longitudes de recta que produzcan la misma pérdida.

Conocido el factor  $n$ , que multiplicado por el diámetro nos da el radio de la curva, se encuentra en la tabla otro factor  $n$ , que multiplicado por el diámetro expresa la longitud de tubería recta equivalente.

Radio de la curva = $n$ veces el diámetro de la tubería = $n \times D$	Longitudes rectas equivalentes = $n$ veces el diámetro de la tubería = $n \times D$
$n = 0,25$	$n = 120$
0,50	75
0,75	35
1,00	17,50
1,25	13,00
1,50	10,00
1,75	9,50
2,00	9,00
2,50	8,75
3,00	8,50
4,00	8,30
4,50	8,15
5,00	8,00

Las válvulas se consideran como curvas de radio igual a 0,25 D y se multiplica la longitud recta equivalente por 1,5. Si hay una pieza especial en T se considera como curva de radio 0,5 D y se multiplica también la longitud recta equivalente por 1,5.

#### Factor que disminuye la pérdida de presión.

El rozamiento de aire por las tuberías o conductos es un consumo de energía que produce calor, del cual una parte se pierde por irradiación y otra queda en el aire absorbido y al no poder éste dilatarse aumentará de presión, que compensará la pérdida por rozamiento en cuantía difícil de calcular.

#### Humedad y formación de hielo.

El aire siempre tiene humedad y la expresión aire seco quiere decir con menos humedad que otro. El aire saturado lleva 100 %. Varía el punto de saturación con la presión y principalmente con la temperatura.

El aire desprende su contenido húmedo por condensación si baja la temperatura o sube la presión. Cada 10° que aumenta la temperatura duplica la capacidad retentiva de vapor de agua invisible.

Al comprimir el aire en la celda marina, algo se calienta, lo que compensa; pero al enfriarse después li-



geramente en las tuberías puede ocasionar condensaciones por los conductos, en los que hay que disponer declividad y depósito suficiente con llaves de purga para la extracción.

En la expansión del aire del espacio libre al descenso de la ola, si la temperatura ambiente ya es baja, podría haber hasta congelaciones, que dificultasen el ajuste de las válvulas.

#### *Tranmisión por doble tubería, cerrando el circuito del aire.*

Al disponerlo así, el aire, en vez de escapar al ambiente, retorna de los motores rotativos que lo utilizan por otra tubería que lo conduce a las aspiraciones de las olas en las celdas, para ser comprimido de nuevo en circuito cerrado. Esto trae ventajas e inconvenientes.

Dada la mínima penetración de las paredes de las celdas en el mar, para no dificultar la transmisión del movimiento ondulatorio, no puede obtenerse mayor rendimiento, por no poder partir la compresión de presión superior a la atmosférica.

Habrán menores condensaciones y congelaciones.

Puede tener el sistema mermas en el rendimiento volumétrico por dificultarse la aspiración.

Duplica el coste de las tuberías.

Duplica pérdidas de rozamiento y aumento de fugas.

Las pulsaciones de la tubería de retorno pueden alterar la marcha regular del motor.

Contribuye a la flotabilidad de los aparatos no fijos, lo cual es de importancia.

### APARATOS DE MEDIDA PARA EL AIRE

#### *Medida de la presión.*

Se utilizan manómetros bien contrastados que pueden ser de aire libre, de aire comprimido o de los llamados metálicos.

#### *Medida del caudal.*

Es necesario aforar el aire para deducir el rendimiento volumétrico, determinar la existencia y cuantía de fugas y calcular la pérdida de presión por rozamiento mediante la fórmula D'Arcy.

Para ello se determina la velocidad del aire como luego se dirá en metros por segundo, se multiplica esta

cifra por la sección de la tubería en metros cuadrados y tendremos el caudal de aire en metros cúbicos que circula por segundo.

En algunos cálculos del aire comprimido se expresa el volumen de éste por minuto, para lo cual basta multiplicar por 60 la cifra hallada.

#### *Medida de la velocidad.*

El tubo de Pitot recibe en la rama que se une con la pared de la tubería la presión estática, y en la otra rama que se abre en el centro de la tubería y contra corriente la presión estática y la dinámica. La diferencia de altura H en agua, es efecto, de la presión dinámica debida a la velocidad del aire.

Se aplica la fórmula

$$v = \sqrt{2 g h} \quad (a)$$

$v$  = velocidad de la corriente en metros por segundo.

$g$  = aceleración debida a la gravedad que en nuestra latitud es 9,80 metros por segundo.

$h$  = altura de la columna de aire libre, que a la presión ordinaria y con la temperatura del que circula por la tubería, equivale a una altura H de agua del tubo Pitot, manómetro diferencial.

$e_{\text{agua}}$  = peso específico del agua o peso del  $m^3$  en Kg. que puede tomarse sin error sensible 1.000 Kg.

$e_{\text{aire}}$  = peso específico del aire libre a la temperatura que tenga el comprimido de la conducción, que se calcula como luego se dirá.

$$(a) \quad v = \sqrt{2 g h} = \sqrt{\frac{2 g h e_{\text{agua}}}{e_{\text{aire}}}} = \sqrt{\frac{2 \times 9,8 \times H \times 1.000}{e_{\text{aire}}}} \quad (b)$$

metros por segundo

El peso específico del aire libre a la temperatura del comprimido se busca interpolando en tablas calculadas con la fórmula siguiente:

$$e_{\text{aire}} = e_0 \frac{P_1}{P_0} \times \frac{t_0}{t_1} \quad (c)$$

en la que

$e_{\text{aire}}$  = peso específico que se busca a la temperatura del aire que circula y presión ambiente.

$e_0$  = peso específico del aire a 0° y presión de 760 mm. de mercurio = 1.293.



- $p_1$  = presión atmosférica del lugar de trabajo.  
 $p_0$  = presión correspondiente a 760 mm., o sea a una atmósfera.  
 $t_0$  = temperatura absoluta a 0° o sea 273.  
 $t_1$  = temperatura absoluta del aire cuyo peso específico se indaga.

Ejemplo: Velocidad del aire con lectura en el tubo de Pitot de  $H = 0,018$ , siendo la presión 0,976 atmósferas y la temperatura del aire 20°.

Peso específico del aire, fórmula (c)

$$e_{\text{aire}} = 1.293 \left[ \frac{0,976}{1} \times \frac{0 + 273}{20 + 273} \right] = 1.293 \times 0,976 \times 0,931 = 1,175 \text{ Kg/m}^3$$

Velocidad del aire, fórmula (b)

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 9,8 \times 0,018 \times 1.000}{1,175}} = \sqrt{\frac{352,8}{1,175}} = 17,33 \text{ m./s.}$$

#### El tubo de Venturi.

Se funda en el teorema de Bernoulli. La energía estática, más la cinética en cualquier parte del tubo, es una constante. Se dispone en la tubería un estrechamiento cónico y el manómetro diferencial de agua con una rama antes del cono y otra después de él. La diferencia de presión estática  $H$  entre la entrada y la salida del cono es proporcional al cuadrado de la velocidad, deduciéndose la fórmula como velocidad en el estrechamiento.

$$v_2 = \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 - a_2^2}} \times \sqrt{\frac{2 \times g \times H \times 1.000}{e_{\text{aire}}}}$$

la fracción  $\frac{a_1}{a_2}$ , que es la razón de cuello, oscila entre

$$\frac{1}{4} \text{ y } \frac{1}{9}.$$

- $a_1$  = sección del tubo en la entrada de la parte cónica en  $\text{m}^2$ .  
 $a_2$  = sección del tubo a la salida de la parte cónica en  $\text{m}^2$ .  
 $v_2$  = velocidad del aire en la sección  $a_2$  en metros por segundo.  
 $g$  = aceleración debida a la gravedad que en nuestra latitud es 9,80 metros por segundo.  
 $e_{\text{aire}}$  = peso específico del aire libre, a la presión del ambiente y con la temperatura del aire com-

primido (se determina como para el tubo Pitot).

$H$  = diferencia de las alturas en las ramas del manómetro diferencial de agua.

El gasto será  $v_2 \times a_2$  = velocidad en m./s.  $\times$  sección en  $\text{m}^2$  = gasto en  $\text{m}^3/\text{s}$ .

#### Aparatos medidores del caudal por lectura directa.

Los hay de varios sistemas, consistentes en flotadores diferenciales móviles equilibrados en la corriente de aire. Los hay de émbolo vertical que se mueve en un cilindro de orificios calibrados. El caudal de aire es proporcional a la sección de los orificios, sin intervenir la velocidad.

Graduados para una presión determinada para otra se multiplica por un factor que da el constructor. Respecto a la temperatura se fija como normal la de 15° y se multiplica, si fuere otra, por

$$K = \sqrt{\frac{15 + 273}{T + 273}}$$

#### RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO DE LA CELDA

Al actuar como compresor para que sea el rendimiento grande requiere:

- 1.º Espacio libre lo más pequeño posible.
- 2.º Válvulas de admisión que jueguen con prontitud y tener una superficie grande, para que se llene la celda rápidamente. El área de las válvulas debe ser a lo menos 15 % de la sección de la celda. Deben ajustar para que no haya fugas en la compresión.
- 3.º Las válvulas de descarga deberán abrirse con prontitud en cuanto la presión llegue a la definitiva y cerrar con tardanza en cuanto se inicie la carrera de aspiración.

#### Válvulas.

Deben ser automáticas que abran y cierren exclusivamente por la diferencia de presión que hay entre el interior de la celda y el conducto respectivo a la atmósfera; para que cierren mejor se presionan con unos muelles.

Las de admisión no se abrirán hasta que el aire tenga presión apropiada y las de descarga no actuarán mientras que la presión no suba sobre la de los conductos de salida, si no hay pérdidas de presión por



la apertura prematura de las válvulas de admisión, o de las de descarga.

Presentan las válvulas a veces pequeñas resistencias al paso del aire, pues como tiene que existir una diferencia de presión para que se muevan, puede ocurrir que tenga que ser excesiva, porque las válvulas sean muy pesadas o los muelles demasiado rígidos. Así, cuando cierran las válvulas de admisión, podría suceder que el aire de la celda tuviera una presión menor que la atmosférica; en tal caso el peso del aire que se comprimiera en cada ola sería menor que el debido, y, en consecuencia, la presión final podría ser algo menor que la obtenible.

Deberían los muelles poderse graduar para distintas presiones para sin variar la celda adaptarse a la altura del oleaje las válvulas.

#### *Refrigeración de la celda por el agua de la ola.*

La evolución isotérmica a igualdad de volumen de aire requiere menor consumo de fuerza que la adiabática.

En un compresor de aire monofásico con camisa de agua se llega a una superficie de enfriamiento de un cuarto de m<sup>2</sup> por m<sup>3</sup> de aire libre aspirado por minuto, a fin de que la temperatura del agua de 20° no pase de 30° a la salida.

La celda de paredes metálicas en parte sumergidas en el agua y constantemente mojadas por cada ola, y con presión de aire final menor que un compresor industrial, está en unas condiciones excelentes para el trabajo isotérmico.

La aspiración de aire conviene sea lo más fría posible, y la celda marina podría aspirar por tubos que pasasen por debajo del agua para refrigerar el aire, ya que 10° puede representar un 5 %, pero tendríamos como contra un roce en las tuberías que nos disminuiría ese resultado.

#### *La celda como émbolo compresor.*

El funcionamiento es perfecto por el ajuste hidráulico de la ola émbolo y no necesitar lubricación. El rendimiento volumétrico de un compresor es el máximo al nivel del mar, a 1.000 m. de altura; perdería el 10 %.

El buen funcionamiento precisa carga, que disminuye la importancia relativa de las fugas, y poca osci-

lación, lo que se consigue al agrupar celdas que abarquen varias olas, pues éstas no todas son iguales, y así unas compensan a otras.

### AEROMOTORES

Para los de tipo pequeño consignamos los siguientes datos. Los compresores rotativos de aire necesitan 1 rodete por cada 1/2 atmósfera y consumen 1 caballo-vapor por m<sup>3</sup> de aire y atmósfera; la velocidad tangencial es de 200 m./s. Estas cifras, aunque el funcionamiento es inverso, dan idea de las características que resultarían para los modelos reducidos.

Para los de mayor tamaño, la teoría de su hélice, distinta de la del avión, está aún en estudio, pero la técnica moderna aerodinámica tiende a la máquina sumergida helicoidal, cuyo órgano transformador esté constituido por varias superficies sustentadoras distribuidas radialmente alrededor de un eje de rotación paralelo a la dirección del viento, o sea aeromotores con hélices cualquiera que fuere el número de sus aspas. Hay que distinguir dos partes distintas: el soporte y el transformador (hélice, rotor, etc.), las dimensiones de éste, la de la potencia y las del soporte las reacciones.

#### *Experimentos.*

Hay una manera muy sencilla para hacer visible lo que podríamos llamar la descarga y aspiración de una celda, o sea la respiración de la misma, y consiste en sujetar un cajón de madera bien calafateada, o bidón metálico, a modo de celda, ya al costado de una embarcación, bien en sitio fijo en la superficie del agua, y unir con un tubo un agujero practicado en la parte superior de la misma y sin escapes a un globo de papel (a un «Montgolfier» de los que ascienden por aire caliente con una esponja de alcohol), dejándolo medio lleno de aire. La altura de la ola, la cabida de la celda y el tamaño del globo tienen que estar en relación y ser este último el mayor, pues de lo contrario se rompería en seguida. El globo se inflará y desinflará alternativamente, siguiendo el subir y bajar de la ola, que es lo que se quería hacer patente.

Hay otra manera de preparar la celda para poder hacer alguna medición del trabajo. En la parte alta de un cajón como en el caso anterior se practica un agujero grande que comunique la celda con una especie de



fuelle (acordeón de cuero), allí con su marco atornillado y que lleve sus guías graduadas y encima se le coloca una caja para cargar pesos conocidos. El peso en kilogramos y el recorrido en metros que suba, junto con el período de las olas, y la superficie de la celda, nos dan la base para el cálculo del trabajo y potencia, llevando también nota de la altura de la ola.

Con estos procedimientos se pueden seguir oleajes sin importancia, pero una celda de experimentos de olas mayores requiere una instalación muchísimo más seria y costosa, ya que no debe crear obstáculos al paso de las olas, para lo cual debiera estar con estribos a distancia, y tener anejos algunos buenos aparatos de medida, de toma de diagramas, inyector de aire, válvula de seguridad, registro entrada, etc.

En algunos puertos construídos se han dejado túneles de comunicación de unas dársenas con otras a través de los muelles y con rejillas de aireación en el centro, que constituyen verdaderas celdas de mampostería, donde los días de temporal es una atracción para el público el ver los soplos gigantes que salen por aquellas rejillas. Algunas escolleras tienen espacios entre bloques que pueden dar parecidos ejemplos.

Se hicieron pruebas múltiples con una sola celda.

La prueba más importante realizada consistió en un aparato flotante de 8 celdas de madera forradas de cinc, cada una de 1 m.  $\times$  0,50 m. de base y 1 m. de altura. Las celdas no contiguas distaban en fila 2 m. una de otra. Tenía el aparato en conjunto 20 m. de largo y llevaba en el extremo un ventilador Root construído exprofeso de 500 Kg. de peso, ayudado éste en su flotabilidad, para que no se ladease, por un travesaño con una boya en cada extremo. El conjunto arriostrado con madera. Las tuberías de ida y vuelta, en ciclo cerrado, eran de 0,15 m. de diámetro, y en cada celda había doble válvula metálica de charnela y junta de goma. Las olas eran de 0,30 m. de altura. El aparato entró en el agua en una playa alejada, y el ventilador giró, confirmando las esperanzas puestas, pero no se pudo realizar ninguna medición con el freno dinamométrico. Hubo que luchar con la corriente, que lo ladeaba contra la costa, adonde allí, al fin, llegó, produciéndose al rozar con la playa el desvenijamiento y escapes en los tubos. Sacado y recompuesto se repitió otro día la prueba con análoga confirmación. No se continuó, porque el pedir mayores medios de remolcador, anclaje, etc., hubiese llamado la

atención, y no se deseaba ir por ese camino público sin estudios previos más detallados.

Hoy, obtenida la patente de invención, se desean seguir las pruebas metódicas sobre las olas, las dimensiones y forma de las celdas, las válvulas, los diagramas y rendimientos, etc., para poder después estudiar la influencia de unas celdas sobre otras contiguas y distantes, y a base de la información que proporcionen esas metódicas pruebas, llegar después a concretar algún aparato fijo de demostración y a proyectar los flotantes y continuar el desarrollo del tema según las circunstancias lo consientan y aconsejen. Las pruebas sobre aeromotores deberán ser forzosamente posteriores al conocimiento de las oscilaciones de los caudales de aire y presiones entre que tengamos que operar.

### ANEJO NÚM. 3

#### ACLARACIONES

##### DIAGRAMAS.

Parecía de lo dicho anteriormente que podían deducirse los varios diagramas obtenibles, y especialmente la parte utilizable de los mismos, pero vamos a dibujar varios casos para aclarar ese punto en lo posible.

*Celda sin válvulas.*—Es decir, completamente cerrada. La presión ascenderá hasta un máximo y descenderá según los volúmenes, siguiendo la misma curva hipérbola supuesta isotérmica. Habrá tantas curvas posibles y diferentes como presiones y volúmenes desde que se inicie.

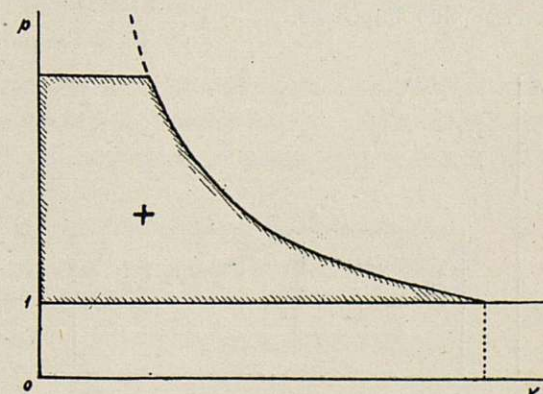


Fig. 33



Figura 33. Si se parte de la presión atmosférica, todo el trabajo será de compresión.

Figura 34. Si se sale de una presión menor que la atmosférica habrá una zona sobre la presión atmosférica.

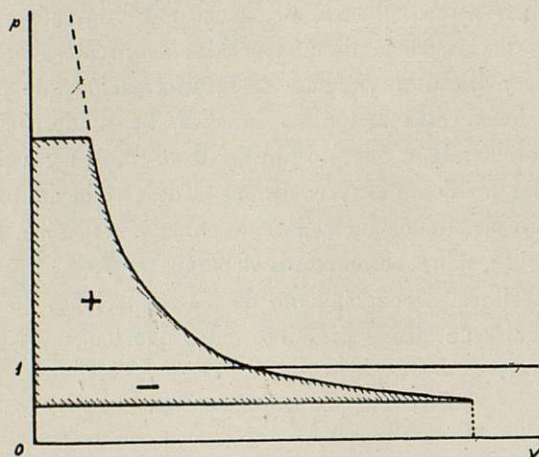


Fig. 34

férica en que el aire estará comprimido, y otra parte inferior en que estará a presión menor que la atmosférica, que eso es lo que se ha querido indicar con los signos + y -. Claro es que, partiendo de presión menor, el espacio interior recorrido será mayor, y menor el espacio respetado por la ola, donde queda el aire comprimido que luego se expande.

En las figuras 33 y 34 el trabajo total de la ola está representado por la superficie rayada, del cual nada es utilizable, y esas superficies, cualquiera que sea la presión de que se parta, deben ser equivalentes en olas iguales, pues el trabajo total es el mismo.

*Celda con válvulas, ciclo abierto.* Figura 35, Podemos dejar la aspirante a la atmósfera y tratar de utilizar el soplo impelente.

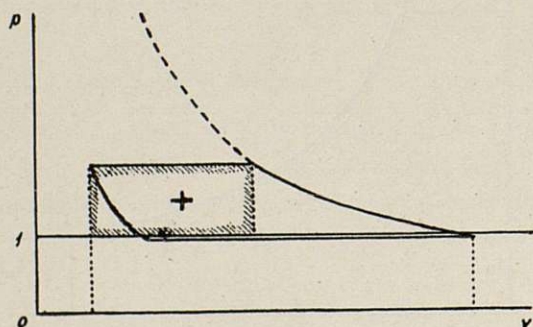


Fig. 35

El diagrama se iniciará por una hipérbola de evolución isotérmica, hasta llegar a la presión de los conductos, momento en que se abrirá la válvula y dará un soplo a presión constante hasta que ésta se cierre. Entonces el aire encerrado en el espacio perjudicial se expandirá según otra hipérbola isotérmica, hasta alcanzar la pequeña fracción de atmósfera bajo la presión atmosférica necesaria para que abra la válvula y admita a presión constante cerrando el ciclo. La curva de trabajo que da la ola a la celda se recorta por la curva que ésta en su expansión le devuelve, pero del trabajo total sólo es utilizable el rectángulo rayado en que se abre la válvula impelente. La ola hará, en igualdad de circunstancias, mayor recorrido interno que estando cerrada la celda sin válvulas.

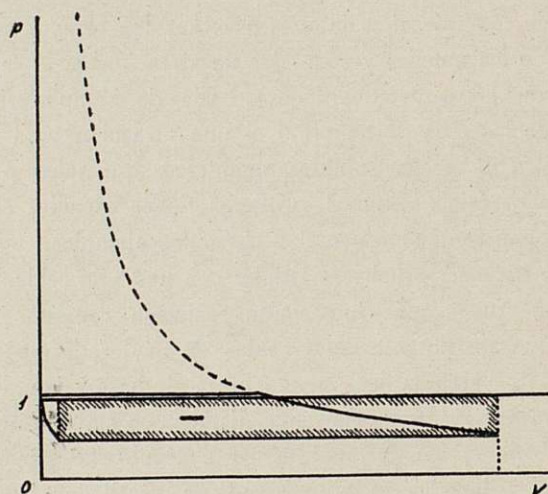


Fig. 36

Figura 36. Podemos dejar la impelente en comunicación con la atmósfera y tratar de utilizar la aspiración únicamente. La impulsión será a presión constante ligeramente superior a la atmosférica para vencer la resistencia de la válvula. La ola hará mayor recorrido interno que si estuviese cerrada o se aprovechara el soplo impelente, como en el caso anterior; por tanto, el espacio final perjudicial será menor que en esos dos casos. La depresión constante producida en la aspiración, mientras la válvula esté abierta, dará el rectángulo rayado en la figura, que es la parte de trabajo utilizable del ciclo.

*Celda con válvulas, ciclo cerrado.*—Figura 37. Podría estar todo el ciclo situado sobre la presión atmosférica o debajo, según se trabajase con aire algo compri-



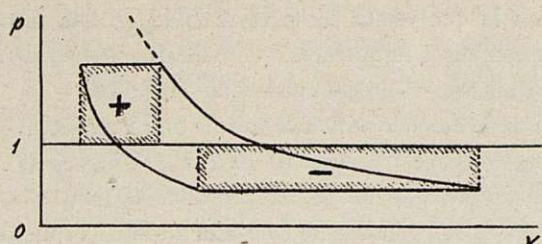


Fig. 37

mido o expandido, pero lo corriente es que esté la figura cerrada, diferencia del ciclo positivo y negativo, situada parte encima y parte debajo de la presión atmosférica, y aun lo más natural parece sería que la celda estuviese llena de aire hasta el nivel normal del mar; si parase la agitación de sus olas, sabido es que el círculo que engendra la trocoide de la ola gira y avanza con su centro un poco sobre el nivel del mar.

La impulsión y la aspiración serán a las presiones constantes de los conductos y resortes graduados de las válvulas.

Habrà dos zonas aprovechables de trabajo, un rectángulo positivo (aire comprimido) y otro negativo (aire enrarecido), y la suma de ambas superficies, para olas idénticas, será igual, cualquiera que sea la presión inicial de que se parta.

#### PRECIO DE LA FUERZA.

Veamos a qué precios unitarios salen las fuentes de energía comúnmente usadas en la industria:

a) *Instalación hidráulica*, incluso central eléctrica, requiere un capital de establecimiento de 3.000 a 4.000 pesetas por HP., lo que depende de que sea un salto de gran altura y poco caudal, lo que es más barato, o bien de mucho caudal y poca altura, con embalse regulador, naturalmente más caro. Supuesto ptas. 4.000 y un interés del 5 % y de amortización 5 % más, resulta un total del 10 % anual por HP. de ptas. 400, que con un coeficiente de utilización del 50 %, o sea unas 4.000 horas al año (el año tiene 8.760), da un precio de ptas. 0,10 el HP/hora, más 0,02 pesetas por lubricantes y mano de obra, da un coste neto de ptas. 0,12 por HP/hora, a pie de central, sin contar líneas de transporte y distribución, pérdidas de energía que ocasionan, corriente devatada, beneficio de la empresa, etc., lo que puede llegar a duplicar aquella cifra, y más, como luego veremos en el ejem-

plo de pequeña instalación consumidora que presentaremos. Así, que anotaremos como coste *total* pesetas 0,25 por HP/hora. (En la actualidad se hacen contratos a 0,35 ptas. Kw/hora, que es su equivalente.)

b) *Instalación de vapor*, por turbina de alta presión y caldera multitubular, puede costar unas pesetas 2.000 por HP., incluso alternador. Al 10 %, como antes, de interés y amortización, da ptas. 200 por HP/año, que a 4.000 horas anuales da ptas 0,05 por HP/hora, más ptas. 0,03 por lubricantes y mano de obra, y combustible a razón de ptas. 0,25, o sea 1/2 Kg. de hulla por HP., se llega al coste *total* de pesetas 0,33 por HP/hora.

c) *Instalación con motores Diesel*, debe contarse un presupuesto de ptas. 1.500 por HP., o sea un coste del HP/año de ptas. 150 y por HP/hora pesetas 0,04 con los mismos % y horas de utilización anotadas en los casos anteriores, más ptas. 0,03 por lubricantes y mano de obra, y combustible gas «oil» pesetas 0,30 da un *total* de ptas. 0,37 por HP/hora.

*Un ejemplo.*—De manera que tenemos unos precios unitarios de ptas. 0,25 a 0,37 por HP/año. Ahora bien, sin fijarnos demasiado en estas cifras de carácter general, vamos a estudiar una instalación más modesta, de consumo irregular e intermitente. Supondremos que se trata de una finca agrícola, con parte en cultivo intensivo de regadío con aguas bombeadas, con el trabajo diario de una pequeña elevación de agua potable, molino de piensos, corta, forrajes, frigorífico, lechería, etc., y el alumbrado de las dependencias. En total, un máximo de 50 HP. y un mínimo de 5 HP., situados a 5 Km. de poblado. Lo más sencillo en este caso sería traer fuerza hidroeléctrica, haciendo una conexión durante 4.000 horas anuales y suponiendo una utilización dentro de ellas de solamente 2.000 horas, o sea el 25 %.

Sin establecer un presupuesto de precios elementales, compuestos, cantidades, etc., vamos a tratar de valorar lo que pagaría el usuario por la fuerza recibida.

Condiciones del posible contrato de suministro:

Por disponibilidad de potencia ptas. 12.000 por HP mes, o sea al año 50 HP $\times$ 12 meses $\times$ 12 ptas. (50 HP = 37 Kw.) ... ..	7.200,00
Pérdida de la línea, de cuenta de la empresa suministradora... ..	0,00
Suma y sigue ... ..	7.200,00



Suma anterior...	7.200,00
Pérdida de transformador en vacío de cuenta del usuario, unos 3 Kw./hora por hora, 2.000 horas de conexión no utilizada, contador mide en alta:	
3 Kw./h. $\times$ 2.000 horas $\times$ 0,25 pesetas Kw./h.	4.500,00
Consumo 40 Kw./h. $\times$ 2.000 horas de utilización $\times$ 0,25 ptas. de tarifa	20.000,00
Corriente devatada, cos $\varphi = 0,87$ del motor asincrónico, tolerancia el 50 % y el exceso ptas. 0,03 Kw./h., para el alumbrado cos $\varphi = 1$	0,00
Línea de transporte de 5 Km., de cuenta del consumidor, corriente trifásica de 15.000 voltios, 50 períodos, y transformación a 220 voltios:	
—Cobre de 3 mm. de diámetro, 3 hilos, suficiente para 40 Kw. que son 7 mm. c/u. de sección mínimo legal, pesa 63 Kg. por Km., precio oficial 13,50 ptas./Kg., y espera 2 años tramitación:	
5 Km. $\times$ 3 hilos $\times$ 63 Kg. = 945 Kg. cobre, 1.000 Kg. cobre a 13,50 ptas.	13.500,00
—Postes de 9 m. altura y 0,18 m. diámetro mínimo cada 50 m.:	
20 postes $\times$ 5 Km. = 100 postes.	
Precio de un poste de madera (con 3 acortes, duración 20 años)...	130,00
Transporte de un poste, hoyo de 1,10 m. y colocación	35,00
3 soportes de hierro de 18 mm. con rosca madera a ptas. 13,00...	39,00
3 aisladores de 15 voltios a ptas. 18,00	54,00
Importe de un poste ptas.	258,00
Total 100 postes $\times$ 258,00 ptas.	25.800,00
Montaje línea 5 Km. $\times$ 1.000 ptas.	5.000,00
Transformador de 40 Kw. en aceite conexión en estrella...	30.000,00
Caseta de obra...	8.000,00
Contador que mida en alta	4.000,00
Cuadro de mármol, pértiga, 3 interruptores, pararrayos, etc.	2.000,00
Dirección e imprevistos	11.700,00
Importe de la línea y transformación pesetas...	100.000,00
Interés 5 %, amortización 5 % por línea y transformación...	10.000,00
Importe anual de la fuerza hidroeléctrica ptas.	41.700,00
Cuyo importe, distribuido entre los 50 HP. durante las 2.000 horas de utilización, o sea 100.000 HP/hora, da el total de ptas. 0,42 por HP/hora.	

Con lo que vemos cómo la realidad de una instalación con sus intermitencias y peculiaridades puede hacer subir algo el precio unitario de la fuerza.

Si utilizásemos para esa misma finca agrícola otra fuente de energía, subsistiría parecida la instalación de baja tensión que no se ha presupuesto, con sus varios motores, bombas, red de alumbrado, y con idéntico presupuesto anual de mano de obra, lubricantes, etc., y por eso no entramos en esos detalles, con ánimo de simplificar. Aunque, claro es, cabría pensar si convendría igualmente la corriente alterna trifásica o podría resolverse con continua, punto que nos desviaría de nuestro tema, y basta para el caso considerar que la instalación de baja tensión, en cualquier forma que se resolviera, sería parecida y económicamente casi equivalente.

*Con energía de las olas.*—Supongamos que la finca agrícola de riego esté situada en el litoral del Mediterráneo, en la zona seca levantina, donde es posible elevar para riego agua subálvea del cauce inferior de algún lecho de río en el que sólo aparecen a la vista los cantos rodados. Parte de la propiedad que bordea el mar se asoma a algún pequeño acantilado rocoso, sitio sólido donde intentaremos colocar las celdas, en número suficiente, para tener la fuerza deseada. El aparato puede ser fijo, por no ser zona de mareas sensibles.

Colocaríamos el aeromotor y dínamo en el interior del acantilado, próximo a las celdas, pero con altura suficiente y en una excavación que lo defienda para no ser batido por el mar. Hay dínamos para pequeñas fuerzas estudiados en su excitación para que acepten grandes variaciones de carga con muy pequeña oscilación del voltaje, y el aeromotor también debería podersele variar la admisión volumétrica, para adaptarse a todas las más posibles circunstancias del oleaje.

Como necesitamos 5 HP. permanentes, quizás convendría un pequeño aeromotor y dínamo para aprovechar los mínimos, y otro de 45 HP. para todos los días de oleaje, que se dedicarían al riego. Se habla en hipótesis, y con todas las salvedades.

En agricultura, los árboles y arbustos de raíces profundas pueden regarse en épocas no apremiantes de calor, y así se resolverían los viñedos, olivares, frutales, etc. En los cereales cabe alguna defensa en primavera, saturándolos de agua previamente en invierno. Los cultivos hortícolas requieren poca masa de agua,



y son los que apremian en su época. Queda en la rotación la parte de praderas artificiales de alfalfa, trébol, etc., que se riegan por inundación cada 10 días en verano, y de esto sí que cabe tener más o menos extensión, según lo que consienta el motor, que aquí son la marejaditas del oleaje. He ahí cómo una fuerza irregular cabe acoplarla a satisfacer una necesidad también irregular, haciéndolo con profundo conocimiento del caso. Con una balsa reguladora cabe guardar el agua de la noche y regar durante el día, con lo que se duplican por lo menos las posibilidades, cuyo depósito puede hacerse exclusivamente a base de tierra arcillosa impermeable. La elevación supuesta de 20 metros, por ejemplo, cabe resolverla con dos aberturas en la tubería impelente, una a 10 m. otra al total, para no tener que elevar demasiado el agua, que luego debe descender a su parcela situada baja. Damos estos detalles como orientación, para que se vea la economía y orden con que se debe operar, pero no vamos a descender a calcular el número de riegos, los cultivos, los litros de agua necesarios por segundo, etc., pues esto se saldría de la finalidad de estas notas.

Oportunamente vimos que de la fuerza teórica de la ola podía utilizarse 25 %, la cuarta parte, estimando se perdía 75 % en la compresión, en el espacio muerto y por válvulas, tuberías y mecanismos, y valoramos esa cuarta parte utilizable en el mediterráneo en 1,2 HP. por m<sup>2</sup>. De manera que para los 50 HP. bastarían 42 m<sup>2</sup> de celdas.

Las celdas podrían resolverse en forma de prefabricar unos paralelepípedos de cemento armado, pretensados, vibrados, etc., a los que faltase una sola cara, la de abajo, y que llevasen encima las aberturas para acoplar las válvulas. Cada uno de ellos podría ser de  $1 \times 2 = 2 \text{ m}^2$ ; así que se necesitarían 21 celdas de esas de cemento armado. La ventaja de esas celdas aisladas es que la inutilización de una de ellas no perjudica la contigua y permite el recambio de las que el mar averíe, al renacer la calma. Esas celdas podrían llevar encima unos apéndices que, como los ensambles de la madera, encajasen en huecos del acantilado, donde el hormigón completaría el ajuste y afianzamiento. Figura 38.

Los acantilados que están batidos por el mar, tienen un sesgo más o menos vertical, pero siempre a la altura del nivel del mar muestran la socavación de la

erosión del agua, de forma variable, según el sentido de la estratificación, y allí, en esa socavación, convenientemente rectificadas los paramentos, es donde hay que afianzar las 21 celdas, aunque no estén contiguas, en forma de que queden a cubierto de la resaca cuan-

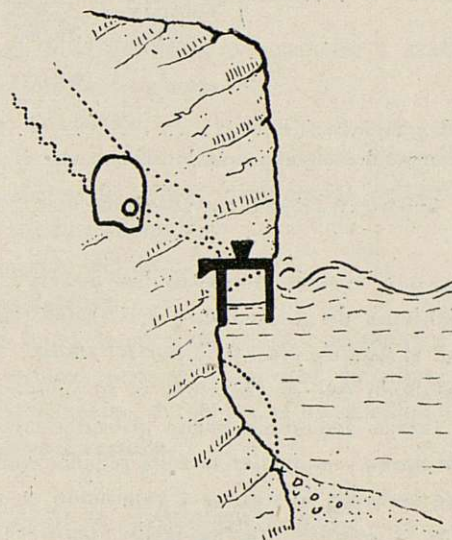


Fig. 38

do se desplome la masa de agua que se alce en el acantilado al reflejarse allí la ola. Supondremos a esas celdas una altura total de 1,50 m. Las tuberías y válvulas tienen que instalarse y poderse revisar desde una galería horizontal excavada en la roca, que llega a la sala de máquinas subterránea donde está el aeromotor y dínamo, y a la que se accede por escalerilla de servicio desde arriba del acantilado, cuya entrada está situada de espaldas al mar y a altura suficiente para que no sea batida por las olas. No se diga que hemos buscado un sitio especial, pues de costas en esa forma hay muchos kilómetros, pero hemos señalado como emplazamiento lo más sólido que hay en el mar, para convencer a los que duden de los aparatos situados sobre arriostrados de hierro, como muchos establecimientos de baños y de las barcas flotantes, como tantas gabarras que están en las obras de los puertos y que operan cuando se puede, y permanecen amarradas cuando no se creen con fuerzas ante un mar agitado.

Después de esta digresión volvamos a nuestras 21 celdas de 2 m<sup>2</sup> prefabricadas en cemento armado.



— Valor de las celdas colocadas 21 × 3.000 pts. = .....	63.000	
Supongamos que cada año haya que amortizar 7, la tercera parte, destruidas por el mar .....	21.000	
Interés 5% .....	3.150	
— Valor de la restante ins- talación. ....		
{ Aeromotor	20.000	
{ Dínamo	35.000	
{ Tuberías	20.000	
{ Varios	25.000	
	100.000	
Interés y amortización 10% .....	10.000	
— Suplemento de mano de obra, lubricantes, etc.	11.000	
Importe anual de la fuerza del mar ptas. .	45.150	

Suma que, distribuido entre los 50 HP. durante las 4.000 horas de utilización, o sea 200.000 HP/hora, resultará el *total de ptas. 0,23 por HP/hora.*

El resultado éste es ventajoso, y se debe a que teniendo fuerza disponible puede utilizarse mayor número de horas y aumentar la zona regada, con el consiguiente aumento de riqueza y valoración de la finca. Se utiliza la potencia práctica media, pero sólo la mitad del tiempo, lo que no es exagerado.

Creemos que resulta prematuro presupuestar lo que no se ha hecho, pero habiendo recibido indicaciones en este sentido, presentamos a la crítica como hipotético ejemplar, el tanteo que antecede, con todas las salvedades y reservas que el caso y la prudencia requieren.

*Comparación con flotadores.*—El volumen de agua que desalojan los flotadores es una constante, y solamente varía con la ola su recorrido vertical, que no es proporcional a las masas oscilantes de agua que a un mayor oleaje corresponden. El que dé la coincidencia de que se haya obtenido como cuarta parte del teórico, un esfuerzo, posible trabajo medio por m<sup>2</sup> de 1,2 HP., parecido al que dicen obtuvo un técnico utilizando boyas, indica la prudencia con que fueron castigados los datos, para no excedernos de la realidad, pues la masa oscilante de agua es mayor que la altura visible de desnivel de la ola. El sistema de celdas que capta todo el esfuerzo vertical de la ola no puede compararse con boyas que siempre buscan, además, el punto fijo junto a la costa, cosa no indispensable en las celdas, a las que basta la reacción de la presión atmosférica, y pueden estar flotantes.

*Comparación con mareas.*—El utilizar las mareas

requiere un lugar geográfico adecuado, grandiosa bahía de boca estrecha que queda inutilizada para la navegación de los poblados ribereños. Por m<sup>2</sup> rinden muchísimo menos que las olas, pues es una ola mayor, pero sólo cada 12 ó 24 horas, según el paraje del globo.

*Almacenamiento de la fuerza.*—La industria suele resolver los problemas por el orden y a medida que se presenten; así que hay que confiar que para todo habría oportunas soluciones, sin necesidad de inquietarse prematuramente.

Podemos ver poderosos auxiliares para utilizar una gran fuerza en las industrias electroquímicas y electrometalúrgicas, que en general requieren poca mano de obra y mucha cantidad de energía, de manera que parecen llamadas a utilizar las fuerzas irregulares, toda vez que cabe dentro del terreno práctico normalizar su marcha y su producción con arreglo a la irregularidad de la fuerza que se les transmita, y hay electrolisis que nos da cuerpos que al volverse a componer nos restituyen la energía gastada actuando de acumuladores.

Hidrógeno, oxígeno, carburo de calcio, el nitrógeno atmosférico, el sodio, el aire líquido, etc., podrían atraer las posibilidades de las grandes fuerzas captadas.

Medios mecánicos permitirían también elevar agua a grandes pantanos, de donde volverían a salir para restituir la energía potencial que acumulasen. Pero esto no hay que hacerlo, ya está hecho; posee España embalses que en pocas ocasiones están llenos; pues bien, no hay duda que destinando la fuerza aleatoria del mar a las zonas de consumo eléctrico, podrían los pantanos retener sus aguas para el momento preciso. Dada la interconexión de cuencas hidrográficas y la posibilidades de transferir la fuerza de unas a otras zonas, como los temporales del mar no son simultáneos en todas las costas, cabe pensar en la posibilidad de utilizar esas fuerzas irregulares mediante la coordinación y cooperación de las redes y pantanos existentes.

*Temporales.*—Cuando hay un ciclón, ¿qué hacen los aviones? Prevenirse por la meteorología y guarecerse. Nadie dirá que la aviación es una cosa llamada a desaparecer porque no puede luchar con las inmensas fuerzas naturales. Nuestros aparatos flotantes pueden hacer lo mismo, que es lo que practican los pescadores, que unos días trabajan y otros aguardan. El hacer una lancha pescadora capaz de aguantar olas de 6 m. de



altura sería antieconómico, lo mismo que el hacer un aparato para aprovechar 100 HP. del oleaje corriente y darle la consistencia de un trasatlántico para soportar 10.000 HP. de un día de temporal.

Al igual que los molinos de viento utilizados en centrales eléctricas, en los que deben calcularse sus hélices no para el máximo viento, ni para el mínimo, que es despreciable, y conviene más no utilizar, sino para los días con agitación mediana. Los aparatos que utilicen la fuerza del oleaje deben graduarse para las marejadillas no peligrosas o que podrían clasificarse de normales, y así es como sacarán la mayor media económica anual.

*Plan de experimentos elementales.*—Nos propondríamos continuar realizando los siguientes ensayos:

Determinación del trabajo máximo de una ola (sumergir una celda sin válvulas hasta que no aumente  $p_2$ ).

Disminución del empuje oscilante en profundidad en relación a la altura de la ola.

Influencia del mayor o menor calado de la celda.

El espacio perjudicial y manera de reducirlo.

Medición separada de la impulsión y aspiración.

Disminución volumétrica al cerrar el ciclo.

Baja presión a que conviene operar para fijar características del aeromotor.

Influencia de la forma de las paredes laterales en la celda.

Válvulas; su disposición, dimensiones y graduación.

Obtención de diagramas.

Efecto adiabático.

Tamaño de las celdas; medidas medias convenientes.

Agrupamiento de celdas; disminución del rendimiento por la proximidad.

Conducción del aire.

Celdas flotantes.

Como se puede apreciar, se trata de aspectos parciales del esfuerzo vertical de las olas, pero que, debidamente coordinados, darán luz sobre el conjunto de la idea que se desarrolla.

Madrid, 24 de septiembre de 1949.

---

*Terminada la lectura del resumen precedente trabajo, sin que se presenten observaciones, se levanta la sesión a las dos de la tarde. Continuada la sesión a las cuatro y cinco de la tarde, ocupan en la Mesa presidencial lugares de preferencia los Excmos. Sres. Ministros de Obras Públicas de España y Portugal, D. José María Fernández Ladreda y D. José Federico Ulrich, y el Presidente del Congreso, señor Marín.*

*Hace uso de la palabra el Sr. Marín y dice:*

*"Una gran honra tienen hoy los ingenieros españoles al ver compartir sus tareas a un ingeniero tan prestigioso como el Sr. Ulrich y, sobre todo, cuando este ingeniero ostenta una representación tan alta como la de Ministro del país vecino —Portugal—, al que tanto queremos y admiramos. También me satisface mucho ver en esta Mesa al Excmo. Sr. Ministro de Obras Públicas, Sr. Fernández Ladreda, cuya presencia añorábamos y que nos complace verle volver de nuevo aquí para compartir nuestras tareas como ya lo hizo en 1919. Sean, pues, bienvenidos."*

*(Aplausos.)*

*El Presidente de la Sección, Sr. Rubio, después de breves palabras de salutación a las personalidades que concurren al acto y con su venia, expone que va a dar comienzo la discusión sobre la ponencia denominada: "El problema eléctrico español", que al Instituto de Ingenieros Civiles de España, propugnador de este Congreso, le pareció conveniente, con acierto indudable, el preparar por un grupo*



de Ingenieros, al igual que se hizo sobre otros problemas fundamentales que competen a los técnicos españoles, y para la exposición y defensa de la misma, dice, nada más grato para mí que conceder la palabra al Sr. Lucía que presidió su desarrollo, y cuyo prestigio y autoridad es de todos reconocido, para que proceda a dar conocimiento de la ponencia mencionada.

A continuación el Sr. Lucía procede a dar un extracto de la ponencia que íntegramente se reproduce a continuación con el título de "EL PROBLEMA ELÉCTRICO EN ESPAÑA", y en cuya preparación intervinieron las personas que siguen:

*Presidente:* Lucía Ordóñez (D. Pedro J.). Ingeniero de Caminos.

*Vocales:* Conde Díaz (D. Enrique). Ingeniero de Minas.  
Fernández Campos (D. Manuel). Ingeniero Industrial.  
Fernández Navarrete (D. Francisco). Ingeniero Agrónomo.  
González Llanos (D. José María). Ingeniero Naval.  
Gutiérrez Cortines (D. Manuel). Ingeniero Industrial.  
Guallart Martínez (D. Eugenio). Ingeniero de Montes.  
Manso de Zúñiga Díaz (D. Leopoldo). Ingeniero Agrónomo.  
Peña y Vea-Munguía (D. Julián). Ingeniero de Minas.  
Querejeta y Goena (D. Manuel). Ingeniero de Minas.  
Redonet y Maura (D. José Luis). Ingeniero Industrial.  
Rubio Sacristán (D. Ricardo). Ingeniero de Caminos.  
Serret Miret (D. Ramón María). Ingeniero de Caminos.

*Secretario:* Susaeta Ochoa (D. Cecilio). Ingeniero de Montes.



## El problema eléctrico en España

(PONENCIA)

### PREÁMBULO

Por el Ilmo. Sr. Presidente de la Junta de Gobierno del II Congreso Nacional de Ingeniería nos ha sido confiada la tarea de redactar la Ponencia IV, dedicada al estudio de «El problema eléctrico en España». Apremios de tiempo hacían imposible el tratar esta cuestión *in extenso*. Ni esto nos hubiera parecido aconsejable, en cualquier caso, por el riesgo de que los detalles perjudicaran la visión del conjunto. De aquí que nos hayamos limitado a una exposición ceñida y apretada del tema, pero esforzándonos por no olvidar ninguno de sus aspectos fundamentales.

Fuerza es reconocer que vivimos estos años en lo que pudiera llamarse, si se nos admite la frase, una «economía de la escasez». Producción agrícola, producción siderúrgica, energía eléctrica, transportes, comercio internacional, etc., etc., todo ello es insuficiente para lo que demanda la situación demográfica actual de España, con su nivel de vida ya adquirido y sus ansias de superarlo. El español medio, el hombre de la calle, que antes apenas si dedicaba por un momento su pensamiento a los problemas económicos, empieza a tener viva conciencia de ellos; como el asmático, que nunca se da más cuenta de lo que es el aire que cuando mayor dificultad tiene para respirarlo.

¿Cómo se ha producido esta escasez? Se ha demostrado (1), con gran copia de datos, que la renta nacional por persona productora, medida en una misma unidad, fija y común, crece en los distintos países con un cierto ritmo, diferente de unos a otros, pero característicos en cada uno de ellos. Si sobreviene una revolución o una guerra, al terminarse, y durante cierto número de años, sufre un retraso, e incluso un retroceso, la ley del crecimiento de la renta por productor, índice de la riqueza; pero la nueva curva, pasada la perturbación pasajera, vuelve, dócil, a unirse a la prolongación de la primitiva, como si nada hubiera sucedido, y la renta específica continúa aumentando, fiel a su tendencia secular. Es indudable que en España, tras la Guerra de Liberación y los trastornos que trajo consigo la segunda Guerra Mundial, nos encontramos todavía en uno de esos períodos de reajuste económico que acabamos de describir sucintamente; período que se alarga más de lo corriente, esta vez, por una razón muy sencilla: porque España está haciendo el titánico esfuerzo de reconstruir y llevar adelante su economía ella sola, virtualmente aislada, sin ninguna ayuda exterior, que, incluso naciones más prósperas e industrializadas que la nuestra

(1) Colin Clark. «The Economics» of 1950.



han necesitado, después de una guerra, para dar fuerte impulso en todas las esferas económicas y apresurar su retorno a la normalidad. Con sobrada razón, y en los tiempos turbios que vivimos, nuestros gobernantes no han querido hipotecar nuestro porvenir político a cambio de concesiones materiales. Era la postura decente y digna, pero no conviene olvidar que ello ha hecho doblemente difícil nuestra reintegración al ritmo antiguo del incremento del bienestar y de la riqueza. A falta del impulso de fuera, nuestra aceleración es lenta y trabajosa. Ha sido nuestro destino el que lo político, por tan altas y poderosas razones, fije así el marco dentro del cual se ha de mover, *volens nolens*, lo económico.

Nos hallamos, pues, siquiera sea transitoriamente, en tiempos de relativa escasez. ¿Por qué el hombre de la calle, al que hacíamos alusión antes, parece sentir aquella escasez más agudamente, en lo que a la energía eléctrica se refiere? Porque la electricidad penetra de tal manera toda nuestra vida, es una sirviente tan universal, tan dócil y proteica, que cuando sufre limitaciones o restricciones su suministro, los efectos se sienten por doquier. Y no deja de ser curioso que, frente a esa hiperestesia pública, bien explicable, ante el servicio de electricidad, está el hecho incontrovertible de que la insuficiencia aquí, en líneas generales, es inferior a la que existe en otros órdenes de nuestra economía, como se muestra en la actual Ponencia.

Ahora bien, no puede negarse que existe un problema eléctrico en España. ¿Cómo ha llegado a nacer? Nuestro crecimiento demográfico persiste incesante, sin saber nada de posibles dificultades económicas. La industrialización del país continúa, acentuada en algunos sectores por la necesidad de bastarnos a nosotros mismos. Todo ello provoca un aumento exponencial, orgánico, en la demanda de energía eléctrica, a un ritmo aún más fuerte del que existía hasta 1936.

Para atender a esta demanda, las potencias totales instaladas han de crecer también exponencialmente, salvo que se obtenga una mejora sensible en las horas de utilización de los Kw. de las centrales; cosa ésta muy difícil y sólo realizable a largo plazo, ya que se oponen a ella la irregularidad de nuestros ríos y nuestras limitaciones de combustible, por un lado, y el bajo factor de carga de los consumos, por otro, en los que todavía no existen ni la diversidad que en otros países, ni grandes cargas básicas de carácter electroquímico

o similares. El problema, puramente de orden de magnitud, se va haciendo más grave a medida que pasa el tiempo. Si, cuando hay sólo un millón de Kw. en servicio, por ejemplo, se necesita un 7 % más anual, hay que instalar al año 70.000 Kw. nuevos. Si los Kw. existentes son ya 2.500.000, el mismo ritmo orgánico exige un esfuerzo enorme para poner en marcha en un año 175.000 Kw. Va cambiando la escala, la unidad de medida. Y todo ello cuando no se dispone en cantidades suficientes, ni de materiales de construcción, especialmente productos siderúrgicos, ni de cobre, ni de divisas para importar la gran maquinaria, motriz y eléctrica, que todavía no se construye en España, aunque son muy de estimar los avances que se van consiguiendo en la nacionalización de estas fabricaciones. Es realmente sorprendente lo que, en estas circunstancias, se ha realizado en estos últimos diez años, como se verá en las páginas siguientes.

Como una verdadera maldición bíblica, ha venido a empeorar todo la sequía excepcional de estos años recientes, acentuada, especialmente, en 1945 y 1949; sequía que ha dejado sin agua, implacable, nuestros embalses; ha hecho bajar a cifras increíbles el caudal de nuestros ríos, y, al provocar una crisis de producción hidroeléctrica, nos ha obligado a quemar grandes cantidades de carbón, que se resta de otros usos. En el presente trabajo se analizan los efectos de esta anomalía meteorológica; aún estamos bajo su nefasta influencia.

En los días que vive el Mundo, y aun en los países, como el nuestro, en que se respeta el principio de la economía de empresa, de iniciativa particular con fines de lucro legítimo, es casi inevitable que el Estado, sea directamente o mediante organizaciones paraestatales, se lance a la palestra económica. Reivindica al hacerlo su derecho, y, a la vez, su deber, de realizar una función tutelar económico-social, prestando servicios a la comunidad allí donde la iniciativa privada se ha mostrado remisa o reacia, ya por no percibir claramente las deficiencias existentes, o por entender, equivocada o acertadamente, que los servicios de que se trata no son rentables y no pueden, por ello, ofrecer suficiente atractivo a los capitales precisos. Incluso en una «economía de la abundancia», este régimen mixto, de empresa privada y de acción paraestatal, da lugar a no pocos problemas, para enlazar y conjugar armónicamente ambos esfuerzos, ejercidos con finali-



dades no coincidentes. Pero estos problemas se agravan en una «economía de la escasez», pues el Estado, en esas condiciones, ha de intervenir forzosamente en el reparto de las materias primas básicas, insuficientes, y de las escasas divisas extranjeras. La distribución de todo ello entre las compañías particulares y los organismos paraestatales exige tacto delicado y amplia visión, objetiva y desapasionada, de todos los problemas que la Nación tiene planteados, con independencia de quien sea el llamado a resolverlos.

Si Dios así lo quiere, pasará la sequía; correrá el agua por nuestros ríos y se llenarán nuestros embalses. No todo estará resuelto con ello. Subsistirá, en el próximo futuro, el problema de tener que poner en servicio cifras ingentes de Kw. cada año, ampliando y modernizando, a la vez, las instalaciones de transporte y de distribución. Sólo el ahorro nacional puede proporcionar los enormes capitales necesarios para empeño de esa importancia. Ahorro solicitado, a la vez, por otras atenciones urgentes de nuestra economía. Nos parece obvio que, ante esa relativa insuficiencia de capitales disponibles, los que se empleen en centrales y líneas, sea quien sea el que las construya, se destinen a desempeñar sana función económica y con recto criterio de abordar y rematar primero aquellas instalaciones cuya rentabilidad y cuyo servicio al país están por encima de toda duda.

Poco más podemos decir en este preámbulo. Sólo nos correspondía aquí encajar el problema eléctrico dentro del económico de conjunto que hoy tiene planteado España y señalar ya, de pasada, algunos de los rasgos particulares del primero, y anunciando, al mismo tiempo, cómo vamos a abordar la cuestión en lo que sigue: con una visión amplia, en adecuada perspectiva; ni con la miopía de exagerado acercamiento, ni con la vaguedad y confusión de excesiva lejanía. Ahora, dejamos que la Ponencia hable por nosotros. Lo hará, buscando una resultante de opiniones, forzosamente diversas, con el más acendrado patriotismo y con depurada objetividad; pero, también, con gran sinceridad; sin temor a ejercer la crítica, serena y respetuosa, allí donde ésta se juzga necesaria; sin recelo a tocar aspectos políticos del tema, ya que éste, como hemos visto, se nos presenta muchas veces, inevitablemente, con esa faz. Al proceder así, y siempre opinando como ingenieros y como españoles, sólo como tales, creemos cumplir un deber de ciudada-

nía, que nos ha sido impuesto al recabar de nosotros el presente trabajo.

Madrid, marzo de 1950.

El Presidente de la Ponencia.

## EL PROBLEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL

El problema eléctrico español consiste, fundamentalmente, en hallar el modo de producir la energía eléctrica necesaria para atender, en todo momento, la demanda del mercado.

La insuficiencia de producción, origen de este problema, es común, en la actualidad, a otras muchas actividades económicas de nuestro país, pero, sin embargo, la industria eléctrica tiene características muy definidas que la diferencian fundamentalmente de las restantes actividades industriales.

Para estudiar el problema eléctrico con completo conocimiento de causa y llegar a soluciones adecuadas, entendemos preciso tener presente, en todo momento, aquellas características diferenciales de esta industria, cuya consideración permitirá centrar el estudio en sus verdaderos términos de aplicación y eficacia. Por ello, señalamos en el primer capítulo las características generales de la producción de energía eléctrica y, en el segundo, aquellas específicas de la de nuestro país, para entrar después a considerar, en capítulos sucesivos, cuál ha sido el desarrollo y cuáles las perspectivas de la producción de energía eléctrica en España, a qué causas se debe la crisis de energía eléctrica, qué es lo que se ha hecho y debe hacerse para remediarla. También indicamos, de pasada, algunas previsiones que parecen razonables, en orden a la conservación de determinados aprovechamientos construídos o que se construyan, ya que, si es de sumo interés mejorar los medios actuales de producción, no lo es menos procurar su perdurabilidad. Por último, señalemos en el capítulo VI cuál es, a nuestro juicio, la política aconsejable o medidas de carácter general que han de adoptarse para ayudar a la más fácil y rápida resolución de nuestro problema eléctrico.

Terminamos este estudio formulando unas CONCLUSIONES en que se recogen y sintetizan las que, a nuestro juicio, han de llevarse a las generales de este II Congreso Nacional de Ingeniería.



## CAPÍTULO PRIMERO

### CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA INDUSTRIA ELÉCTRICA

Las características generales de la producción de energía eléctrica que la distinguen y diferencian, en forma más o menos notoria, de las restantes actividades industriales, pueden resumirse en las siguientes:

A) *Su importancia fundamental.*—La actividad industrial de una nación se puede medir por su consumo específico de energía eléctrica. Cualquier fallo o restricciones en el servicio eléctrico, determina graves repercusiones en la actividad de las restantes industrias y en la vida de toda la nación; por ello, de todos los servicios públicos es, sin duda, el servicio eléctrico uno de los de mayor importancia y aquél cuyos defectos se revelan con más amplia resonancia.

Esta importancia fundamental de la producción de energía eléctrica exige que las soluciones que se busquen a sus problemas tengan absoluta eficacia y garantía, pues, mientras existan restricciones, por pequeñas que éstas sean, subsistirá íntegramente el problema, con repercusiones en todas las actividades del país.

B) *Características especiales de la producción.*—La producción de la energía eléctrica tiene características que la diferencian también, fundamentalmente, de la de un producto fabril.

Las dos únicas fuentes de energía que, hasta hoy, tienen valor industrial son las constituidas por los saltos de agua y las centrales térmicas. Las restantes fuentes de energía hasta ahora ensayadas (fuerza del viento o de las olas, mareas, diferencias de temperaturas a distintas profundidades en el mar o la tierra, etc.), tienen interés muy relativo hoy por hoy; y, en cuanto a la aplicación de la energía nuclear, en la que se tienen grandes esperanzas, no parece que, hasta dentro de quince o veinte años, cuando menos, estén resueltos los problemas que plantea su empleo a escala industrial (véase Anejo núm. 1).

De todos modos, interesa sobremanera seguir de cerca estos estudios, pues, hacia el año 1972 (véase el Anejo núm. 4), puede estimarse que la demanda de energía, de continuar aumentando el ritmo actual, agotará nuestras posibilidades de producción en centrales

térmicas e hidráulicas, y habrá que buscar la nueva energía de otras procedencias.

Las dos fuentes clásicas de producción hasta la fecha, hidráulica y térmica, tienen cada una, a su vez, características diferenciales que limitan o condicionan su utilización.

En la producción térmica, con independencia de las que emplean combustibles líquidos, pueden considerarse tres grupos de centrales:

1.º Las que generan la energía, bien para utilizar los gases naturales o procedentes de otras industrias (tales como hornos altos), o bien para aprovechar diferencias de presión del vapor que se consume en la industria matriz (azucareras, industrias de destilación, químicas, etc.). La producción térmica de estas centrales puede compararse, en cierto modo, con la producción hidráulica fluyente, pues es una producción imposible de aplazar por su utilización.

2.º Centrales térmicas que queman carbones de calidad inferior (menudos, «schlams», mixtos, etc.), procedentes, en muchos casos, de menudos inaprovechables de los residuos de extracción de las minas o de los lavaderos para la obtención de carbones utilizables industrial o domésticamente.

3.º Centrales que queman carbones comerciales de calidad superior.

La producción térmica, partiendo de combustibles líquidos, puede proceder, o bien de utilizar estos combustibles en los hogares de las calderas de vapor, o bien de motores Diesel o de explosión. Estos últimos son especialmente indicados para atender demandas de punta, por la rapidez de su puesta en servicio. En general, la producción térmica procedente de combustibles líquidos es más cara que la procedente del carbón, y en los países que no disponen de yacimientos petrolíferos, representa un dispendio de divisas para su balanza comercial.

Estas tres clases de centrales térmicas tienen, todas ellas, algunas condiciones generales que han de cumplir para su posible instalación y normal funcionamiento, y, entre éstas, podemos citar la necesidad de agua de refrigeración para los condensadores en cantidad y calidad suficiente en todo momento del año. Esta condición limita muchas veces e imposibilita la instalación o puesta en servicio de una central térmica.

Los transportes han de ser, igualmente, fáciles y económicos para abastecer los parques de la central,



del combustible preciso y evacuar las escorias que se producen.

Las centrales térmicas necesitan también revisiones periódicas que las dejan fuera de servicio, aparte de las averías que, con más frecuencia que en las hidráulicas, se presentan, por el duro trabajo a que están sometidos sus elementos fundamentales, especialmente las calderas.

Aparte de estas condiciones generales, cada uno de los tres grupos de centrales térmicas tienen condiciones especiales que las caracterizan y diferencian. Las del primer grupo, como hemos indicado, tienen necesidad de estar situadas como anejos de la industria principal, con muy poca elasticidad en su producción.

Las del segundo grupo, debido al poco valor del combustible que utilizan, no admiten económicamente grandes desplazamientos de aquél, y, por tanto, han de instalarse en las cuencas mineras, de modo que su emplazamiento viene fijado por esta condición y por la disponibilidad de agua para refrigeración, y no por las necesidades del consumo, y tienen también poca elasticidad en su funcionamiento, por la dificultad de acumular carbones pobres indefinidamente. En algunos casos se originan combustiones espontáneas en los parques de almacenamiento.

Las centrales del tercer grupo son las que tienen mayor elasticidad en su producción y en su emplazamiento, pero, en cambio, requieren carbones de alta calidad que no en todos los países existen disponibles para esta aplicación, que es la menos adecuada técnicamente, y además, la energía producida resulta a costos muy superiores por el valor intrínseco del combustible. Sólo se reduce, en parte, ese mayor costo cuando se trata de grandes centrales modernas, que trabajan a elevadas temperaturas y presiones.

En la producción hidráulica se distinguen, fundamentalmente, dos grupos de centrales:

1.º Las que utilizan una corriente de agua sin regular o con muy escasa regulación.

2.º Las que disponen de una regulación mensual, anual e, incluso, hiperanual.

Las centrales del primer grupo han de funcionar normalmente, como base, ya que el agua que dejen de utilizar se perderá irremisiblemente, a no ser que puedan absorber la energía en industrias electroquímicas o electrometalúrgicas que puedan acoplar su marcha a la irregularidad, a corto plazo, del agua fluyente, o

bien en los casos, poco frecuentes, de poderse emplear esta energía para elevar agua a cotas superiores, cuyo aprovechamiento posterior es posible. En cambio, las centrales del segundo grupo pueden acoplarse mejor a la demanda del mercado, aunque, como es natural, para iguales caudales utilizados, han de estar tanto más equipadas en potencia disponible cuanto menos horas funcionen al año.

Las características generales de las centrales hidráulicas pueden resumirse en las siguientes:

a) Situación determinada de los aprovechamientos, definida por el emplazamiento geográfico de aquéllos y no por las necesidades del consumo de energía.

b) Producción dependiente de las condiciones meteorológicas, la cual está afectada tanto más por los sequiajes cuanto más prolongados sean éstos y menor la capacidad de regulación de la central que se considere.

c) Mayor valor de primer establecimiento que las centrales térmicas, salvo casos excepcionales, y ello determina que las cargas financieras en el coste del kilovatio hidráulico sean muy superiores a las del kilovatio térmico.

d) Imposibilidad, en muchos casos, de habilitar embalses reguladores, que encarecen aún más, cuando son posibles, el primer establecimiento de estas centrales. La construcción de dichos embalses presenta, a menudo, grandes dificultades, ante la necesidad de inundar pueblos y vegas ricas, desviar carreteras y ferrocarriles, etc.

e) Costo creciente de los aprovechamientos hidroeléctricos, por la doble influencia del índice creciente de los precios (fenómeno éste que ya parece crónico en todos los órdenes de la vida económica), y por ser preciso utilizar progresivamente aprovechamientos más distantes de los centros de consumo, de construcción difícil y menos económicos que los hasta ahora equipados.

f) Necesidad de acoplar las necesidades hidroeléctricas con las de otras utilidades del agua de los ríos, siempre de primordial interés, tales como abastecimiento de agua potable a las poblaciones, regadíos, navegación, etc.

La rápida enumeración que acabamos de hacer de las características principales de las producciones termoeléctrica e hidroeléctrica, señala claramente que aquellas características diferencian fundamentalmente



la producción de la energía eléctrica de otras muchas actividades fabriles, en que las fábricas pueden instalarse con mucha mayor elasticidad, tanto en su localización geográfica como en su capacidad productora.

g) *Imposibilidad de almacenamiento.* — A diferencia de las restantes industrias, en la producción de energía eléctrica es técnicamente imposible el almacenar la energía generada, pues las baterías de acumuladores, aparte de su mal rendimiento y elevado coste de instalación y conservación, tendrán siempre, y cada vez más, importancia ínfima con respecto al orden de los consumos.

Solamente es posible en algunos casos, como hemos indicado, almacenar en embalses reguladores el agua para las centrales hidráulicas, pero ello encarece grandemente el precio de la energía, por el coste de aquellos embalses. En las centrales térmicas se ofrecen más posibilidades de almacenar combustible en cantidades importantes en las centrales que utilizan carbones comerciales, y esto, con las naturales limitaciones de capacidad de los parques y de disponibilidad de los capitales necesarios.

En las centrales térmicas instaladas a bocamina, es posible, en ocasiones, llevar la explotación minera de manera que parte de las reservas de combustible se hallen en el interior, para intensificar la extracción en momento oportuno; pero esto requiere contar con suficiente capacidad de personal e instalaciones.

Esta dificultad de almacenamiento, conjuntamente con la característica instantánea de la demanda, a que luego haremos mención, determina una de las principales características de la producción de energía eléctrica, pues en otras industrias y servicios suele ser posible atender las puntas de la demanda, con las producciones hechas en los períodos del año en que aquella demanda descende.

h) *Características del transporte de la energía.* — Otra de las peculiaridades de la producción de energía eléctrica consiste en que el transporte de la mercancía, o sea el Kw-h. que se vende en el domicilio del abonado, es siempre costoso, no obstante la gran ventaja de su posibilidad. Por diversas causas, sobradamente conocidas, el transporte y la distribución de esta mercancía, que exige siempre capitales importan-

tes invertidos en líneas, subestaciones y redes, acarrea pérdidas que crecen a medida que aumenta la demanda; el mantener estas pérdidas dentro de límites razonables, exige fuertes desembolsos en conductores y artificios de compensación de las líneas.

Esta característica obliga al ingeniero a procurar siempre que los transportes de energía sean los mínimos posibles, y como, por otra parte, la situación geográfica de las centrales productoras, salvo el caso, muy excepcional, de centrales térmicas que queman combustibles ricos, viene determinada por condiciones ajenas a la voluntad del empresario y a las necesidades del consumo, resulta más difícil en esta industria que en otra cualquiera su planteamiento y explotación económica, aunque, como contrapartida, exista la gran ventaja de la facilidad y flexibilidad con que se presta la potencia eléctrica a su transformación, transporte y distribución.

i) *Carácter instantáneo de la demanda.* — Otra característica de los suministros de energía eléctrica es el cumplimiento instantáneo del servicio. El contrato firmado con un abonado para una cierta potencia, exige que el mero hecho de cerrar un interruptor dé instantáneamente paso a la corriente, en la amplitud convenida y con el voltaje y frecuencia acordados. Esto exige que, para la normalidad del servicio, haya de existir en todo momento margen suficiente entre la capacidad de producción y la demanda posible.

La rigidez de la producción a que antes hemos hecho referencia, unida a este carácter instantáneo de la demanda sin aviso previo, exige que la producción de energía eléctrica haya de tener potencia importante de reserva, normalmente improductiva y que, a veces, haya de desperdiciarse energía en forma de agua vertida por los aliviaderos de las centrales hidráulicas, para, posteriormente, tener necesidad, en algún caso, de aquella energía que no se pudo aprovechar.

La demanda, además de su carácter instantáneo, tiene, como característica, muy apreciable variación dentro del día, pues, tanto los consumos de los abonados particulares como de los industriales, coinciden siempre en determinadas horas, en tanto que existen otras horas, generalmente, de madrugada, en las que el consumo es mínimo.

j) *Progresión constante de la demanda.* — Esta úl-



tima característica de la producción de energía eléctrica es, a nuestro juicio, la que se destaca en forma más manifiesta frente a las restantes actividades industriales. Toda la estructura de la producción, transporte y distribución de la energía está influida por el incremento constantemente creciente de la demanda, y, aunque ello pueda parecer común con otras industrias, tiene como característica fundamental en la producción de energía eléctrica que, al ir creciendo esta demanda se van quedando *simultáneamente* insuficientes todos aquellos medios antiguos de producción y, sobre todo, de transporte y distribución, lo que exige no solamente la puesta en servicio constante de nuevas centrales de potencias unitarias, cada vez mayores, ya que el consumo crece según progresión exponencial, sino también la modificación fundamental y, en muchos casos, la substitución de los anteriores medios de transporte y distribución, al tener que aumentar la tensión de las líneas, instalar nuevos interruptores con mayor capacidad de ruptura, cambiar los transformadores por otros de mayor tensión y capacidad, incrementar la potencia síncrona compensadora, modificar, fundamentalmente, las redes de distribución, etc.

En la producción de energía eléctrica, en la que el aumento de la demanda se duplica aproximadamente en el mundo cada diez años (véase Anejo núm. 2), las nuevas centrales se saturan unas después de otras, en plazos cada vez más cortos. Todo nuevo consumo precipita la fecha en la cual una nueva central ha de entrar en servicio o en la que un elemento del sistema deberá ser duplicado o reemplazado por otro más potente, y esto determina continua inversión de capitales, que crece aún más de prisa que el aumento de la demanda, por la influencia simultánea del incremento de la misma y de la depreciación de los medios de pago. La necesidad de disponer cada vez más rápidamente de mayores capitales para el normal desenvolvimiento de la producción de energía eléctrica, determina una de las características que han de tenerse más en cuenta al estudiar el problema eléctrico, ya que, en la actualidad, es en todos los países la generación de energía eléctrica una de las actividades que mayores capitales tiene empleados, pero en un futuro próximo será, sin duda alguna, la actividad que en todas las naciones figure como la primera en cuanto a medios económicos se refiere (véase Anejo núm. 3).

## CAPÍTULO SEGUNDO

### CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LA INDUSTRIA ELÉCTRICA EN ESPAÑA

Aparte de las características generales de la producción de energía eléctrica que hemos indicado en el capítulo anterior, cada país tiene una fisonomía especial, que es la que determina y condiciona su producción y distribución de energía.

En tanto que algunas naciones disponen de combustibles abundantes y su producción eléctrica es fundamentalmente térmica, en otras es posible utilizar grandes recursos hidráulicos para la generación de energía.

Dentro de Europa, los Países Escandinavos y los que rodean el Arco Alpino, principalmente Suiza e Italia, disponen de grandes recursos hidráulicos, especialmente, en los meses de deshielo de las nieves que alimentan sus ríos. En otros países, tales como Bélgica y Holanda, sus posibilidades eléctricas son exclusivamente de carácter térmico, con buenos combustibles y una excelente red de canales para el transporte de aquéllos y refrigeración de sus centrales.

Francia, participa simultáneamente de las posibilidades térmicas de sus cuencas carboníferas, que son las primitivamente aprovechadas con preferencia, y de las posibilidades hidráulicas de los Pirineos, Ródano y Macizo Central, de más moderna utilización, de modo que se equilibran en la actualidad ambas producciones.

Dentro de la Gran Bretaña se dan características diferentes en Inglaterra y en Escocia, ya que, en la primera, su producción es casi totalmente térmica, en tanto que, en Escocia, es posible aprovechar su riqueza hidráulica. A este respecto es interesante señalar que en el informe, presentado al Parlamento inglés en diciembre de 1942 por el «Committee on Hydro-electric development in Scotland», se señala que las especiales condiciones de agua abundante y escasez de carbón de la región, así como su industria poco concentrada y población muy dispersa, diferencian fundamentalmente la producción de energía eléctrica de la de las restantes zonas de la Gran Bretaña, ya que la «producción hidroeléctrica como fuente de energía tiene diferentes características económicas y financieras que en las centrales térmicas».

En España, señalamos a continuación los rasgos



esenciales de nuestra producción y demanda de energía eléctrica:

*Posibilidades eléctricas de España.*—Desde comienzos del siglo se han hecho diferentes estudios para fijar, de manera más o menos aproximada, cuáles eran las posibilidades eléctricas de nuestra nación. Es de observar que las posibilidades que revelaban aquellos estudios han ido aumentando cronológicamente, según iban siendo más completos los conocimientos de nuestras cuencas hidráulicas y carboníferas. Muy recientemente han publicado tres ingenieros españoles tres avances de estas posibilidades nacionales (véase Anejo núm. 4), en los que se da una casi completa coincidencia, que permite aceptarlos como muy aproximados. Estos avances corresponden a:

Don Enrique Uriarte, Ingeniero de Caminos, en el artículo que, con el título «La energía eléctrica en España», publica en la *Agenda Financiera* del Banco de Bilbao, en noviembre de 1949.

Don Antonio Martínez Cattaneo, Ingeniero de Caminos, en el artículo que, con el título «Apuntes sobre el futuro eléctrico español», publica la *Revista de Obras Públicas*, correspondiente a junio de 1949.

Don José Luis Redonet, Ingeniero Industrial y Director de UNESA, que, con los datos de que dispone esta entidad, presentó, en mayo de 1949, un trabajo a las II Jornadas de Ingeniería Industrial, con el título «La industria eléctrica en la industrialización de España», en el que se incluía un avance del inventario de las posibilidades eléctricas nacionales, recogido posteriormente en la *Revista de Ciencia Aplicada*, en el número noviembre-diciembre de 1949.

Los resultados a que han llegado estos tres técnicos son los siguientes:

	Producción posible en millones de Kw-h anuales
<i>Sr. Uriarte:</i>	
Térmica .....	2.977
Hidráulica .....	28.000
<i>Sr. M. Cattaneo:</i>	
Térmica .....	3.000
Hidráulica .....	37.000
<i>Sr. Redonet:</i>	
Térmica .....	2.900
Hidráulica .....	32.000

Es curioso observar esta casi absoluta coincidencia entre estudios realizados por técnicos diferentes y partiendo de consideraciones distintas. El Sr. Cattaneo llega a una cifra más elevada en producción hidráulica posible, por estimar aceptable una utilización mayor que los señores Uriarte y Redonet.

Admitiendo como avance aproximado las anteriores cifras, podemos sentar la conclusión de que la economía eléctrica española, de acuerdo con sus posibilidades, ha de estar fundamentada principalmente en la producción hidráulica, ya que ésta representa en energía un 90 %, aproximadamente, de nuestras posibilidades totales, aunque, en potencia, esta proporción pueda ser superior al 10 % para las centrales térmicas, cuya utilización normal debe ser inferior a la de las centrales hidráulicas.

*Características de la producción hidráulica española.* Nuestra producción hidráulica, con excepción del sistema pirenaico, está basada, fundamentalmente, en el aprovechamiento de los ríos de la Meseta Central, cuyo máximo caudal se presenta en los meses de invierno, cuando, precisamente, es mayor la demanda de energía, y en esto tenemos una ventaja indudable sobre otros países europeos, en los que el máximo de sus producciones hidráulicas coincide con los meses de deshielo, correspondientes a la primavera y verano, de menor demanda. Sin embargo, los ríos españoles se caracterizan por su extraordinaria irregularidad, pues pasan, normalmente, a lo largo de corto período, de varios miles de metros cúbicos por segundo a aforos prácticamente inapreciables (véase Anejo núm. 5). Ello determina la necesidad de seguir una política de construcción de embalses reguladores que, afortunadamente, se comenzó desde hace varios años por las empresas eléctricas y por el Ministerio de Obras Públicas, con un amplio plan que permitirá, cuando esté terminado, no solamente regular los principales ríos, sino, incluso, invertir el régimen de alguno de ellos, para aprovechar al máximo nuestras posibilidades hidráulicas. Esto ha creado problemas de transvase que precisará estudiar y resolver en cada caso (véase Anejo núm. 6).

Como medio interesante para contribuir a la regulación de los ríos, cabe también señalar la necesidad, con el auxilio del Estado, de una repoblación forestal de sus cabeceras que permita disminuir los rápidos



coeficientes de escorrentía de algunas regiones, y regularizar los caudales y aportaciones.

En el Anejo núm. 7 tratamos con más extensión de los considerables beneficios que una adecuada repoblación forestal de las cuencas de los ríos puede proporcionar, tanto con la disminución de los coeficientes de escorrentía tan variables, como con la disminución de los arrastres, especialmente, en tramos de ríos de carácter torrencial, como es el caso corriente en las cabeceras de cuenca, con su inevitable secuela de aterramientos de embalses, inutilización de compuertas de fondo, etc.

Pero, esta labor repobladora, obra larga, costosa y delicada, no obstante su indiscutible interés, encaja difícilmente entre las tareas exigibles a las entidades constructoras de los aprovechamientos. Primeramente, por la cuantía de los desembolsos necesarios, que si siempre son ampliamente remunerados, sólo lo son a largo plazo, y, en segundo lugar, por requerir elementos de ejecución y dirección, al margen, normalmente, de las disponibilidades de aquellas entidades, y, muy fundamentalmente, por la gran extensión de terrenos sobre los cuales la iniciativa privada ha de actuar, sin que exista medio de hacérselos fácil y económicamente accesibles.

Por todo ello, parece que deba ser función del Estado, a través de su propia organización competente, la atención de este problema, ampliando y coordinando sus trabajos de corrección de torrentes y repoblaciones con las más inmediatas necesidades de las construcciones hidráulicas, con o sin cooperación de las entidades constructoras.

Del examen de los datos estadísticos referentes al comercio exterior se deduce que, si bien la agricultura española contribuye poderosamente al sostenimiento de nuestras exportaciones, es innegable que somos deficitarios en productos fundamentales para la alimentación, y que queda mucho por hacer en cuanto al aprovechamiento integral de nuestro suelo. Para ello, aparte de disponer de los fertilizantes precisos, han de convertirse en regadío extensas zonas de secano, de escaso o nulo rendimiento en la actualidad. Ello obliga a que los embalses de regulación de los ríos, aparte de las finalidades de abastecimiento de aguas e hidroeléctricas, tengan, en muchos casos, como fundamentales, las de regadío, las cuales condicionan el régimen de desembalse de algunos pantanos, en los que la

producción eléctrica pasa a segundo término, subordinada a aquellas necesidades.

En cambio, en España no encuentra el aprovechamiento hidroeléctrico de los ríos las dificultades que en otros países se presentan, por la necesidad de conservarlos navegables, lo que exige costosas construcciones de esclusas y canales. Únicamente en el río Ebro y en el Guadalquivir se mantiene esta condición en sus tramos inferiores. No hacemos especial referencia a la compatibilidad de los aprovechamientos hidráulicos con la pesca, muy abundante en algunos ríos españoles, pues ello se resuelve fácilmente, mediante la legislación que actualmente existe sobre esta materia.

Otra de las características de la producción hidráulica española radica en que, por haber sido de los primeros países que comenzaron a utilizar el potencial de sus ríos para la producción eléctrica, existen infinidad de centralitas instaladas (véase Anejo núm. 8) en los primeros años de la generación de energía eléctrica, las que, en gran parte, hoy día resultan antieconómicas y contrarias a un aprovechamiento integral de los ríos, que es a lo que debe tender y adonde debe dirigirse nuestra lógica política hidráulica en el porvenir, aunque justo es reconocer que, en determinados casos, por las características especiales de algunos tramos de los ríos, es conveniente y necesario continuar la instalación de las pequeñas centrales que resulten de interés.

#### *Características de la producción térmica española.*

Es un hecho evidente que hemos de procurar ajustar nuestra producción termoelectrica, en todo lo posible, al carbón nacional de que podamos disponer para este uso, ya que las importaciones de combustible, aparte de un gasto de divisas necesarias para otros fines, haría depender de modo permanente nuestra producción industrial de la voluntad de otros países.

Si la regulación necesaria de la producción hidráulica no pudiera conseguirse íntegramente con los embalses reguladores o con la producción térmica autárquica, debido a los reiterados ciclos de sequía, sería preciso prever la importación de carbón para centrales térmicas, como hasta ahora lo hacemos, y como se ven obligados a realizar otros países, como Italia.

La producción de carbón nacional en España, no obstante los meritorios esfuerzos realizados por parte de los Poderes Públicos y empresas mineras, aumenta



muy lentamente, y toda la de buena calidad se absorbe con exceso por una serie de industrias y servicios de primordial interés (véase Anejo núm. 9).

Durante los años de penuria de energía eléctrica en que estamos viviendo, ha sido muy difícil conseguir combustible en las cantidades y calidades precisas para un funcionamiento normal de las escasas centrales térmicas instaladas que utilizan carbones ricos, y ello se ha logrado solamente a costa de fuertes importaciones de carbón extranjero (véase Anejo núm. 10). Parece, por tanto, evidente que la producción termoeléctrica en España ha de tender, fundamentalmente, a utilizar carbones nacionales pobres o inútiles para otros aprovechamientos, en centrales a bocamina, y, en este supuesto, han hecho sus cálculos de posibilidades térmicas los tres ingenieros a que antes nos hemos referido.

Nuestras centrales térmicas fundamentales han de encuadrarse, por tanto, de preferencia, en el grupo segundo de las que indicábamos en el Capítulo I, es decir, *Centrales de bocamina que quemen residuos o carbones pobres*.

Las centrales del grupo primero, o sea, las que utilizan gases residuales (de hornos altos o de otras industrias), o bien, escalones de vapor para otros usos, tienen, de momento, importancia secundaria en España, si se exceptúan las que ha construido y tiene en construcción la Empresa Nacional «Calvo Sotelo», del Instituto Nacional de Industria, para atender sus industrias destiladoras (Puentes de García Rodríguez, Puertollano y Escatrón), que comenzarán funcionando como centrales térmicas del sistema eléctrico nacional.

Salvo las centrales térmicas ya instaladas en centros de consumo (Barcelona, Valencia, Bilbao, Madrid, etc.), que utilizan carbones ricos y que deben conservarse, e incluso, ampliarse alguna de ellas, y alguna más que, acaso, sea necesario instalar, nuestra producción térmica vendrá, fundamentalmente, basada en centrales situadas geográficamente en puntos determinados en las que existan posibilidades de refrigeración y fáciles comunicaciones con la cuenca minera de cuyos carbones pobres se alimente, y ello determina una rigidez de ubicación en nuestra futura producción térmica, que ha de tenerse muy en cuenta al enfocar el problema general de nuestra producción de energía eléctrica.

La energía termoeléctrica de España, salvo muy con-

tadas excepciones, ha de tener exclusivamente las siguientes finalidades:

a) Servir de apoyo regulador a la producción hidráulica fluyente, aunque esto ha de tratar de conseguirse, con preferencia, mediante embalses en la cabecera de los ríos.

b) Servir para atender los aumentos de demanda del mercado, en tanto que se terminan las centrales hidráulicas en construcción, garantizando de esta forma, mediante una producción térmica ocasional, la entrada en explotación con un mercado propio de los nuevos aprovechamientos hidráulicos.

c) Servir como reserva o socorro, tanto en potencia como en energía, para casos de extraordinario sequiaje o averías.

En ningún caso debe substituirse por energía térmica una producción hidráulica posible, a menos que circunstancias especiales lo impongan, pues el agua que escapa por los aliviaderos de las centrales, representa una energía perdida para siempre, en tanto que el combustible que deja de quemarse en una central térmica puede siempre utilizarse con posterioridad y, en todo caso, representa una riqueza nacional imposible de reemplazar.

En cuanto a la relación que es conveniente que exista entre la potencia térmica instalada y la potencia total de una nación, depende, como es natural, de las necesidades de regulación de las producciones hidráulicas fluyentes y de las características de la curva de consumo. Los experimentos de estos últimos años en otros países de condiciones semejantes al nuestro y la experiencia de aquéllos recogida, parecen aconsejar que dicha relación no ha de ser inferior al 20 %, si se quiere cumplir eficazmente las tres funciones antes señaladas de la producción térmica y, al mismo tiempo, ha de procurarse para ello que las centrales térmicas fundamentales estén conectadas ampliamente con los nudos importantes de la red primaria de líneas de transporte e interconexión.

#### *Características de la demanda del mercado español.*

El consumo de energía en España está caracterizado por la utilización correspondiente a un país de mediano desarrollo industrial, ya que hasta ahora, tienen poca importancia las grandes industrias electroquímicas y electrometalúrgicas que permitan grandes consumos regulares de energía.



De los estudios realizados (véase Anejo núm. 11) para determinar cuál puede ser la utilización normal del conjunto de nuestras centrales eléctricas, se deduce que, en la actualidad y en el próximo futuro, no pueden admitirse más de 3.100 horas con un servicio normal, y esto, sin tener en cuenta que pueden presentarse ciclos anormales de sequía como el que actualmente atravesamos, en el que sería imposible alcanzar dicha utilización, aun a costa de fuertes restricciones, y, no obstante, no existir el margen de potencia indispensable para un buen servicio. En el Capítulo IV, al tratar de la sequía como causa determinante de la crisis de energía, señalamos las escasas utilidades obtenidas de nuestro potencial hidráulico en los últimos años.

Según la última estadística oficial del Sindicato Vertical de Agua, Gas y Electricidad, el mercado de energía en 1948, se distribuye de la siguiente forma:

— Alumbrado público .....	1,43 %
— Alumbrado particular y usos domésticos ....	13,29 %
— Electroquímica, electrometalúrgica e industrias análogas.....	6,99 %
— Usos agrícolas .....	2,02 %
— Tracción eléctrica .....	6,51 %
— Industrias en general .....	42,92 %
— Consumos propios .....	2,86 %
— Pérdidas.....	23,98 %

Comparando estas cifras con las de otros países (véase Anejo núm. 12), se deducen las siguientes consecuencias:

En España, el capítulo de pérdidas y consumo propio es excesivo en comparación de los restantes países, debido ello, principalmente, a las dificultades de los últimos años para la construcción de nuevas líneas, refuerzo de las existentes, aumento de capacidad en las estaciones de transformación y ampliación de las redes distribuidoras. Con la entrada en servicio, en el año 1949, de la nueva línea Valladolid-Bilbao, en la Zona Centro-Norte, esperamos que cuando esté ultimada la estadística de 1949, se pueda comprobar que las pérdidas han disminuído con relación al año anterior. Todas las Empresas eléctricas están dedicadas intensamente a disminuir este capítulo, que no debería exceder de un 18 ó 20 %.

Examinando el Anejo núm. 12 se observa que, como es lógico, las pérdidas son superiores en los países con importante producción hidráulica, que requiere largos transportes de energía para llegar a los centros de consumo, que en los países que, como Bélgica y Gran Bretaña, tienen casi exclusivamente producción térmica, con centrales situadas en las proximidades de los centros de consumo.

El porcentaje de consumos para alumbrado particular, usos domésticos y pequeña fuerza motriz, es también inferior en España con relación a otros países. Sin embargo, es de observar que en este aspecto no están unificados los datos estadísticos, ya que en España la pequeña fuerza motriz no está incluida, en general, en este apartado. En la electrificación de los hogares destacan, como es lógico, Estados Unidos, Gran Bretaña y Suiza, que son las naciones que tienen más adelantada esta electrificación.

En tracción eléctrica, España ocupa una posición intermedia en cuanto al porcentaje de la energía en ella utilizada, y en un plazo próximo aumentará, probablemente, este porcentaje cuando se pongan en marcha las electrificaciones ferroviarias previstas.

En la proporción de consumo de la gran industria, también ocupa España posición intermedia, con relación al resto de las naciones.

Por otra parte, la población española está, en general, poco concentrada, salvo las aglomeraciones demográficas e industriales de la región catalana, la región vascongada, la zona de Levante, la zona de Sevilla y la población de Madrid. Desgraciadamente, nuestros medios productores, de rígida instalación, tanto hidráulicos como térmicos, coinciden escasamente con estos centros de consumo, y ello determina la necesidad de transportes de energía de longitud mucho mayor que en otros países, con el consiguiente aumento en las pérdidas.

Parece lógico que, en el porvenir las nuevas industrias que se instalen y que precisen de grandes cantidades de energía, busquen, mientras ello sea posible, los lugares en que sea fácil disponer de aquella con abundancia, sin largos y costosos transportes, y, de este modo, por consideraciones eléctricas, se modificará, en sentido favorable para nuestra economía, la geografía industrial de España.



### CAPITULO III

#### DESARROLLO Y PERSPECTIVAS DE LA PRODUCCIÓN, TRANSPORTE, DISTRIBUCIÓN Y CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ESPAÑA

*Desarrollo de la producción de energía eléctrica en España.*—Hacia 1875 se inicia la producción de energía eléctrica en España con fines prácticos, saliendo del campo puramente teórico y experimental de los laboratorios de física de aquella época. Los primeros ensayos se realizan a base de atender pequeñas zonas de alumbrado público en las grandes capitales españolas mediante la energía obtenida por grupos electrógenos, compuestos, generalmente, de motores de gas pobre y dinamos de corriente continua. En esta etapa inicial surgieron innumerables dificultades de orden práctico, e incluso de orden económico, ya que las instalaciones resultaban notablemente caras en proporción al costo de otros medios de alumbrado y, aparte de ello, existía una gran prevención ante este nuevo invento. Algunos comercios y establecimientos públicos comenzaron la instalación de focos en sus dependencias, pero siempre en unidades aisladas y más bien a guisa de propaganda que con el propósito de obtener resultado definitivo. A comienzos del siglo XX, la mayor parte de las fuentes de producción eran de origen térmico, aunque ya se había iniciado unos años antes la utilización de la energía hidroeléctrica mediante la transformación de pequeños molinos que, en ciertas horas, facilitaban energía a los medios rurales donde estaban enclavados.

De hecho, la limitación de la expansión y progreso de la producción de energía eléctrica en sus comienzos, fué debida, prácticamente, al desconocimiento de las posibilidades de la corriente alterna, ya que la corriente continua no permite transportar la energía a medianas y grandes distancias, sino que exige la instalación de los medios de producción muy cerca del consumo. Hacia principios de siglo se inician algunos ensayos de transmisión de la energía mediante la corriente alterna. Los ingenieros españoles comprendieron pronto que era éste el camino para la utilización de la energía hidroeléctrica de nuestro país, con una orografía muy pronunciada. Por ello, precisamente, es en España, dentro del ámbito europeo, donde se inician ensayos de gran trascendencia, e incluso figura a la cabeza en las primeras transmisiones de ener-

gía de origen hidroeléctrico a los centros de consumo, con distancias que ahora parecen insignificantes, pero que en aquella época representaban verdaderos esfuerzos de la técnica y de la economía. Uno de los primeros ensayos realizados con excelente éxito tuvo lugar en Zaragoza, en 1901, al transportar a aquella capital los 400 HP. del molino de San Carlos, situado al pie del Canal Imperial de Aragón, distante algo más de tres kilómetros. Este transporte fué el segundo que se hizo en el Mundo en estas condiciones; fué el primero, muy poco antes, el de Lansen-Francfort. Algunos años después, España es la primera nación de Europa que utilizó la tensión de 66.000 voltios en la línea Molinar-Madrid, con 250 Kms. de longitud. Entonces comenzó la explotación en gran escala de la energía eléctrica, introduciéndose definitivamente en la industria y desplazando a las innumerables máquinas de vapor y pequeños grupos de generación propia que existían en las fábricas de aquella época. Importantes grupos financieros emprenden obras de gran trascendencia, y comienzan a delinearse en muchas regiones de España las actuales zonas eléctricas de producción y consumo.

Prosigue en los años siguientes el desarrollo intenso de la producción de energía eléctrica con completa normalidad hasta la Guerra de Liberación, consecuencia de una facilidad de medios por parte de las empresas para incrementar las posibilidades de producción, lo que permitió disponer de un elevado factor de seguridad en la relación producción-demanda, no superado por las sequías más intensas entonces registradas.

*Labor coordinadora de las empresas y actividades paraestatales.*—En 1940, terminada la Guerra de Liberación española, y ante el fuerte incremento de la demanda de energía, consecuencia de la recuperación industrial y económica que permitió el régimen de estabilidad y permanencia, como fruto de la Gloriosa Cruzada, surgió la necesidad de aprovechar íntegramente nuestras posibilidades productoras, para lo que era preciso que nuestro sistema eléctrico alcanzase rango nacional, de modo semejante a lo que en otros países ya se había conseguido. Para ello, sólo había dos caminos posibles: el primero, el seguido por Francia, entre otras naciones, donde estatificó el Gobierno la generación, transporte y distribución de energía eléctrica, con resultados que la experiencia demuestra, por



ahora, poco favorables; el segundo camino consistía en que las grandes empresas productoras, voluntariamente se unieran en una sociedad común, aunque conservando cada una su propia personalidad, con la finalidad de dar unidad al sistema eléctrico del país y utilizar al máximo la producción posible de energía eléctrica, ofreciendo así al Estado, por parte de la iniciativa privada, lo que en otros países el Estado había tenido que imponer. Este fué el nacimiento de «Unidad Eléctrica, S. A.» (UNESA), que tuvo lugar en agosto de 1944, y que agrupó originariamente las quince grandes empresas productoras de energía eléctrica de la Nación, cuya producción representaba, aproximadamente, el 80 % de la total de España.

Como funciones estatutarias de UNESA, figura, en primer lugar, «la conjugación de la producción mediante los programas de utilización de la energía, conducentes a lograr el aprovechamiento más completo posible de las fuentes generadoras y un amplio abastecimiento de los mercados». Los resultados obtenidos, dentro de las desfavorables condiciones de los últimos años, han sido satisfactorios, y se ha prestado leal colaboración a los organismos públicos en la función distribuidora de la energía eléctrica a que han obligado las restricciones pasadas.

Como consecuencia de la escasez de energía que ya se preveía desde 1941 y que empieza a manifestarse en el año 1945, las empresas privadas se lanzan a un amplio plan de nuevas construcciones que no tiene precedentes en la vida industrial de España y que da como resultado la puesta en servicio, entre otras, de centrales tan importantes, entre las hidráulicas, como la de Argoné, en el río Essera; la de Viella, en el Valle de Arán; las de Flix y Cereceda, en el río Ebro; la de Villalcampo, en el Duero; las de Almoquera y Zorita, en el Tajo; las de Rozadío, Peña de Bejo y Herrerías, en el río Nansa; la de Las Conchas, en el Limia, etc., etc., y centrales térmicas de la importancia de la de Lada, en la cuenca de Asturias; Guadaira, en Sevilla; Grao, en Valencia, y ampliaciones de las de Ujo, en Asturias, y Burceña, en Bilbao, entre otras.

El mismo Estado, a través del Instituto Nacional de Industria, toma parte activa, aunque en mucha menor proporción que la iniciativa privada, en la producción de electricidad, e importa en 1946 diez centrales móviles, preparadas en Inglaterra para servicios

de la guerra mundial que acaba de terminar, y las instala en sitios apropiados de la Península para paliar las restricciones eléctricas. Igualmente, el Estado constituye en 1944 la Empresa Nacional de Electricidad, como filial del INI, con la principal finalidad de instalar en Ponferrada una central térmica que utilice los menudos de antracita de aquella cuenca; central que ya se encuentra en servicio. También a través del INI, en 1946 funda la Empresa Nacional Hidroeléctrica del Ribagorzana, para el aprovechamiento integral del río Noguera-Ribagorzana, en el Pirineo Catalán.

La Empresa Nacional «Calvo Sotelo», constituida en 1942, y también filial del INI, cuya principal finalidad es la fabricación de abonos, carburantes y lubricantes, partiendo de la destilación de carbones pobres y que proyecta tres factorías en Puentes de García Rodríguez (Coruña), en Puertollano (Ciudad Real) y en Escatrón (Zaragoza), respectivamente, comienza sus actividades por la instalación de tres centrales térmicas en los mencionados lugares; la primera, en funcionamiento, y las otras dos, en construcción avanzada, y las que, al mismo tiempo que servirán en su día para abastecer de energía a las industrias respectivas, cuando ello sea necesario, pueden, por el momento, conectarse al sistema eléctrico nacional como reserva del mismo.

Los embalses proyectados y en construcción por el Estado para regulación de nuestras principales cuencas hidráulicas, acrecentará también la energía eléctrica disponible en cantidad importante, tanto por la generada en los aprovechamientos de pie de presa de los citados embalses, como por el incremento de la que se produzca como consecuencia de la regulación en los saltos de agua fluyente, hoy existentes aguas abajo de los mencionados pantanos.

La valoración de tal energía supondrá la importante cifra de unos 2.000 millones de Kw.-h. al año, pero su producción tendrá características especiales, debido a que ha de acomodarse a las épocas de desembalse para el riego.

*Actual sistema eléctrico nacional.*—Como consecuencia de la situación de hecho que existía en el momento de constituirse UNESA, ha quedado España dividida en las seis Zonas eléctricas siguientes: Catalana, Aragonesa, Centro-Norte, Noroeste, Centro-Levante y



Andaluza. Cada una de estas Zonas constituye, en cierto modo, un sistema eléctrico independiente, y los intercambios de energía entre estos sistemas son los que, principalmente, regula en la actualidad la UNESA, de acuerdo con los organismos oficiales en los períodos de restricciones.

La *Zona Catalana*, cuyo mercado representa, aproximadamente, el 28 % del nacional, se caracteriza por una producción hidráulica que radica fundamentalmente, en la actualidad, en los aprovechamientos del Pirineo en el sistema hidráulico del Flamisell, Noguera-Pallaresa y Segre, así como el aprovechamiento sito en el río Ebro, en Flix. Dispone, igualmente, de centrales térmicas en la ciudad de Barcelona, y de la central de Figols, a bocamina de los lignitos de esta localidad. El mercado se caracteriza por gran abundancia de pequeñas industrias y gran densidad de población, sobre todo en la región del litoral, y sus posibilidades futuras residen, fundamentalmente, en el aprovechamiento hidráulico integral del Valle de Arán, en curso de realización; en los aprovechamientos en el río Ebro, en su tramo inferior, y en el sistema del Noguera-Ribagorzana, que construye ENHER, así como en la térmica de Escatrón, de ENCASO, que aprovechará los lignitos de la zona más rica de España en esta clase de combustible.

La *Zona Aragonesa*, de mucha menor producción y consumo, ya que representa solamente un 4 % del nacional, tiene sus sistemas hidroeléctricos en los ríos del Pirineo Aragonés y en el Jalón. Su mercado se caracteriza por una gran industria electroquímica en Sabiñánigo, y por el centro industrial y urbano de Zaragoza. Sus posibilidades futuras residen, fundamentalmente, en el aprovechamiento de los lignitos de la zona de Aliaga, en la central de este nombre, de Eléctricas Reunidas de Zaragoza, en período de pruebas en la actualidad; en la central de Escatrón, de ENCASO, común con la Zona Catalana, y en los nuevos aprovechamientos hidroeléctricos posibles de la región pirenaica.

La *Zona Centro-Norte*, cuyo mercado representa un 19 % del nacional, tiene su mayor consumo en las provincias vascongadas, con industria muy intensa y extendida, y dispone de dos sistemas hidroeléctricos principales de producción: uno, en el Pirineo Aragonés, en los ríos Cinca y Cinqueta, y otro, en la cuenca del Duero. Ambos sistemas hidroeléctricos se

apoyan en la central térmica de Ponferrada, de la Empresa Nacional de Electricidad, y en la térmica de Burceña, instalada en el centro de consumo de Bilbao.

Su mercado se caracteriza por la gran industria pesada, principalmente siderúrgica, y por la pequeña industria, muy importante y variada, que se desarrolla en toda la zona del litoral. Sus posibilidades futuras residen, entre otras principalmente, en el aprovechamiento integral del sistema del Duero, con sus afluentes y tramo internacional con Portugal, de grandes reservas en potencia.

La *Zona Noroeste* tiene, en la actualidad, gran profusión de aprovechamientos hidroeléctricos de pequeña importancia individual, pero de gran rendimiento industrial en todos los ríos de la vertiente cantábrica. El principal en explotación es el Navia en la zona asturiana, y en construcción los de Salime en Asturias y los del Miño y Sil en Galicia, de mucha mayor importancia. Su producción térmica se basa, fundamentalmente, en la riqueza carbonera de Asturias, con centrales a bocamina, y en la utilización de los lignitos de Puentes de García Rodríguez por la central térmica de ENCASO en aquella localidad. Su mercado, que representa un 18 % del nacional, se caracteriza por un gran predominio del consumo industrial, así como por el servicio de las minas de carbón, cuyo funcionamiento sin restricciones es fundamental para la Economía del país. Las posibilidades futuras de esta Zona residen, principalmente, en el aprovechamiento, ahora iniciado, de los ríos Miño y Sil, en la región gallega, y del río Navia en su cabecera. Por otra parte, la cuenca carbonífera asturiana permite aún la instalación de nuevas centrales térmicas de bocamina.

La *Zona Centro-Levante* tiene su producción hidroeléctrica fundamentada en las cuencas de los ríos Tajo y Júcar, y su producción térmica, de escasa importancia por no disponer de zonas carboníferas, radica, principalmente, en las centrales instaladas en Valencia y en Madrid. Su mercado, que representa, aproximadamente, el 20 % del nacional, se caracteriza, en la región levantina, por una industria importante y gran consumo para los riegos mediante elevaciones de agua con motobombas. En la región Centro destaca el consumo de Madrid como típico de gran población y el de su pequeña industria circundante. Las posibilidades futuras de esta Zona residen fundamentalmente en el aprovechamiento integral de los ríos Júcar y Ca-



briel, de grandes recursos el primero, una vez regulado con el pantano de Alarcón, recientemente construido, así como en el aprovechamiento integral de la cuenca del Tajo, regulado igualmente el río principal con los grandes pantanos de Entrepeñas y Buendía, en curso avanzado de construcción, en su cabecera.

El sistema hidroeléctrico de la *Zona Andaluza* está fundamentado en la cuenca del río Guadalquivir que la recorre de punta a punta, así como por los aprovechamientos posibles en otras cuencas de menor importancia. La producción térmica básica de esta Zona reside, fundamentalmente, en las centrales de Sevilla y en la región minera de Puertollano, donde ENCASO está construyendo su central térmica y donde la Sociedad Minera y Metalúrgica de Peñarroya tiene también otra central de menor importancia en explotación. El mercado de la Zona Andaluza, que representa un 11 % del nacional, se caracteriza por el consumo industrial de Sevilla, de gran desarrollo en los últimos años, así como por la pequeña industria muy diseminada en toda la comarca y, sobre todo, por los riegos e industrias agrícolas de las ricas zonas de esta región. Las posibilidades de la Zona Andaluza residen, fundamentalmente, en la utilización integral del río Guadalquivir y sus afluentes, con la regulación que proporcionará el gran número de pantanos en construcción, así como en los aprovechamientos de gran altura de Sierra Nevada. Los aprovechamientos de pie de presa de los pantanos de Cijara y Puerto Peña, en el río Guadiana, tendrán también gran interés para el suministro de energía a esta Zona.

*Nuevas construcciones en el período 1940-1949.*—Al terminarse la Guerra de Liberación, y en previsión de la crisis de energía que se preveía, se inició después de terminar la reconstrucción de lo destruido intensísimo plan de nuevas construcciones por parte de las sociedades eléctricas, que ha dado ya como resultado la puesta en servicio en estos nueve años de una nueva potencia de 615.590 kw. y el tener en la actualidad en construcción, más o menos avanzada, 1.883.000 kw. en nuevas centrales. El detalle de estas cifras puede verse en el Anejo núm. 13. La potencia total instalada en 1939 era de 1.729.933 kw.

Este esfuerzo constructivo realizado por las empresas eléctricas en España, que no tiene precedentes en ninguna otra rama de nuestra actividad industrial, no

ha tenido, desgraciadamente, plena eficacia por la excepcional sequía de los últimos años, de la que nos ocuparemos en el capítulo siguiente; pero demuestra cumplidamente el esfuerzo de las empresas españolas productoras de energía eléctrica para conseguir atender el servicio público que tienen encomendado.

#### *Demanda real de energía en el período 1929-1955.*—

En el Anejo núm. 14 se representa la demanda de energía entre los años 1929 y 1955. En este Anejo pueden distinguirse tres períodos diferentes: el primero, de 1929 a 1943, en el que la demanda de energía ha coincidido con la producción, ya que consideramos las pérdidas como un abonado más, que tienen que soportar todas las empresas y, por tanto, siempre que hablamos de *demanda* de energía nos referimos a la *producción* necesaria para atenderla.

En el segundo período, que comprende los años 1944 a 1949, la producción de energía fué inferior a la demanda del mercado, lo que determinó la necesidad de establecer unas restricciones cuyo valor calculado viene representado en color azul en el gráfico, por la diferencia entre ambos conceptos.

En el tercer período, 1950-1955, se indica la demanda estimada de energía para cada uno de los años del mismo.

Para la determinación de los valores correspondientes al primer período (1929-1943), hemos utilizado la estadística anual de energía eléctrica que empezó a publicar en 1929 la Cámara Oficial de Productores y Distribuidores de Electricidad, y que, a partir de 1942, ha sido continuada e incrementada por el Sindicato Vertical de Agua, Gas y Electricidad. Esta estadística, desde sus comienzos, es una de las más completas y mejor orientadas de que dispone la industria española, pero, debido precisamente a su constante ampliación y mejora, resulta que cada vez figuran en la estadística datos de mayor número de empresas, aumentando por ello artificialmente la producción de energía, que se revela en la estadística a lo largo de los años. Hechas las correcciones precisas, se pueden llegar a determinar las verdaderas producciones de energía eléctrica en cada uno de los años 1929-1943. (Véase el folleto de UNESA, «Pasado, presente y futuro de la energía eléctrica en España», mayo de 1947.)

En el segundo período, 1944-1949, conocida ya la proporción de energía no contenida en la estadística



del Sindicato, queda únicamente por determinar el valor de las restricciones en cada uno de dichos años. Estos valores han sido también calculados por UNESA, comprobando cómo se iban reflejando en la contracción de la demanda cada una de las medidas de restricción que se implantaban, así como los aumentos de consumo que originaba la supresión de estas medidas. Al mismo tiempo se han tenido como elementos de juicio los datos que cada una de las empresas facilitaba sobre sus propios mercados. También ha servido para este cálculo el conocer cuál era la variación normal, sin restricciones de la demanda de energía en un día laborable de cada uno de los meses del año (véase Anejo núm. 15).

Conocido el porcentaje que representa en el consumo anual el de cada uno de los meses, como en los años de restricciones siempre hubo períodos en que los mercados no han estado sujetos de modo directo a las mismas, se ha podido determinar de una manera bastante aproximada, conociendo el valor de la demanda en estos meses sin restricciones, cuál hubiera sido la total de año. Ultimamente, en los meses de diciembre de 1949 y enero de 1950, las escasas restricciones aplicadas en el ámbito nacional, han permitido comprobar, una vez más, la exactitud de los datos previamente calculados, ya que la demanda normal del año 1949 puede estimarse, con gran aproximación, en 7.280 millones de kw-h. (véase Anejo núm. 16.) El valor calculado de las restricciones en energía en la etapa 1944-1949 es el siguiente:

Año 1944 .....	390 millones de Kw-h.		
Año 1945 .....	1.200	»	»
Año 1946 .....	370	»	»
Año 1947 .....	350	»	»
Año 1948 .....	600	»	»
Año 1949 .....	1.792	»	»

*Demanda prevista para el futuro.*—El incremento de demanda de energía realmente registrado en los últimos años, que refleja el Anejo núm. 14, viene a confirmar el que puede fijarse con la necesaria amplitud en el futuro en un 6,5 % para 1950 y 1951, y en un 7 % anual, a partir de 1952, el del mercado español, sin restricciones de ninguna clase, coincidiendo en este aspecto con el valor medio registrado en otros países, que vimos en el Anejo núm. 2.

Si admitimos estos incrementos y suponemos, igual-

mente, una utilización inicial posible de 3.100 horas de nuestra potencia productora, que podrá llegar escalonadamente a 4.000 horas en las últimas etapas del aprovechamiento integral de nuestras reservas eléctricas, podemos establecer el cuadro que figura en el Anejo núm. 17, en el cual se señala el ritmo requerido para la entrada en servicio de nuevas potencias. Los capitales que han de movilizarse, tanto en moneda nacional como en divisas, para llevar a la práctica el plan preciso para poner en servicio estas nuevas potencias resultarían realmente impresionantes, y ello demuestra la ineludible necesidad de resolver urgentemente el problema económico de esta actividad nacional y ponerla en condiciones de que pueda obtener y remunerar esos capitales procedentes del ahorro nacional, así como las divisas necesarias para el desarrollo de sus planes, a menos de ocasionar un daño irreparable a la Economía española.

El que una parte de las concesiones eléctricas tengan un plazo fijo de reversión agrava el problema financiero, ya que, lógicamente, han de poder establecerse amortizaciones suplementarias sobre las normales de todo negocio para poder reembolsar, al terminar aquel plazo, sus capitales a los accionistas.

#### CAPITULO IV

#### LA CRISIS DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA Y SUS CAUSAS

La producción de energía eléctrica en España es, según hemos indicado, dentro de las fundamentales de nuestra economía, la que ha evolucionado más rápidamente en los últimos años. En el Anejo núm. 18 figuran un cuadro y un gráfico en los que se comparan las producciones anuales de energía eléctrica, carbón, cemento, lingote de hierro, lingote de acero y mineral de hierro, tomando como base la de 1940. Puede apreciarse en dichos gráficos el enorme incremento de la producción eléctrica en relación con las demás. No obstante esto, a partir de 1944 se produce una escasez de energía en España que ha repercutido desfavorablemente en la Economía nacional. Las tres causas que han determinado esta situación por su coincidencia desfavorable son las siguientes:

a) Aumento intenso y progresivo de la demanda.



b) Dificultades para la puesta en servicio de las nuevas construcciones.

c) La sequía excepcional que venimos padeciendo desde 1944.

Si examinamos el cuadro a que hacemos referencia en el Capítulo III (véase Anejo núm. 14), se observa que, una vez pasado el período 1939-1942, de rápida recuperación de la situación anormal creada por la Guerra de Liberación, la demanda del período 1942-1949 ha crecido con incremento anual del orden del 6,4 %, y este incremento, algo superior al que se registró en nuestro país en el período 1929-1935, es del mismo orden que el que corresponde actualmente, como media, al conjunto de la demanda eléctrica mundial en los países industriales.

No puede, por tanto, considerarse como un excepcional e inesperado aumento de esta demanda, el que ha provocado la crisis eléctrica sufrida, pues ya a principios de 1941, y basándose exclusivamente sobre los datos de 1935, el ilustre Ingeniero de Caminos don Esteban Errandonea (q. e. p. d.), en una conferencia organizada por la Asociación de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, pudo afirmar que entre los años 1945 y 1946 se produciría una crisis de energía eléctrica en España. Esta crisis se adelantó ligeramente, debido a la sequía excepcional en determinadas zonas el año 1944.

La dificultad para la puesta en servicio de las nuevas construcciones, influye ya de manera más apreciable e imprevisible en la crisis de energía. En el año 1935 existían en España excedentes eléctricos; gran parte de la posible producción de Saltos del Duero estaba sin colocar. El mercado estaba entonces bajo el signo de la oferta. Durante nuestra Guerra de Liberación hubo forzosa inactividad en cuanto a la construcción de nuevas centrales, y la Guerra Mundial creó a continuación una serie de dificultades de todo orden, que siguen en la postguerra, para recuperar el ritmo de construcciones necesario al crecimiento de la demanda de energía.

En la época normal de la anteguerra, la construcción de las centrales hidroeléctricas de cierta importancia requería un período comprendido entre tres y cuatro años y, por tanto, bastaba con mantener este desfase entre el comienzo de las obras y la necesidad de su puesta en explotación. En el año 1939, al terminar la Guerra de Liberación, la primera preocupa-

ción de las empresas eléctricas fué, naturalmente, reparar los daños sufridos en sus instalaciones y rehacer sus planes de nuevas construcciones. Cuando comenzaron éstas a ejecutarse (1940-1941), la Guerra Mundial ocasionó serias dificultades para contratar la maquinaria que, necesariamente, había de venir del extranjero. Posteriormente, conocidas dificultades políticas de tipo internacional, que ya se han señalado en el Preámbulo, han dificultado el que nuestro país pueda disponer, con la amplitud necesaria, de las divisas precisas. El plazo para la construcción de nuevas centrales hubo de elevarse, como promedio, a cuatro, cinco o más años, y esto, unido al crecimiento ininterrumpido del mercado, como consecuencia del período de tranquilidad social por que ahora atraviesa España, y a la excepcional sequía de que a continuación nos ocuparemos, determinó que se agotase rápidamente el margen de reserva que existía entre la posibilidad de producción y la demanda del consumo, y que se llegase a la difícil situación por la que se ha pasado en el último período.

Por último, la *sequía excepcional* que venimos padeciendo desde 1944, es el factor más importante, a nuestro juicio, en la crisis actual de energía.

Hasta 1944 las sequías registradas en nuestro país se presentaban en forma de años excepcionalmente secos, alternados con otros normales o húmedos; pero desde 1944 se ha entrado en un verdadero ciclo de sequía permanente que ha agotado, no sólo las reservas de nuestros pantanos, sino también las reservas subálveas de las cuencas de nuestros ríos, fallando cada año, bien las nieves del invierno o las lluvias de primavera o del otoño. En los años 1945 y 1949 se han producido simultáneamente todas las condiciones desfavorables. El caudal de los ríos ha sido muy inferior al mínimo de los años más secos que registraba la estadística. En el Anejo núm. 19 damos los aforos mensuales de los principales ríos de importancia hidroeléctrica, comparando los registrados en los últimos años con los considerados como media en un largo período anterior. El examen de estos datos dispensa de todo comentario.

El problema de la sequía es general en toda Europa y ha determinado restricciones en todos los países con producción hidroeléctrica, aunque, como es natural, estas restricciones han sido mayores en aquellas naciones en que, como España, su producción de ener-



gía eléctrica básica es la hidráulica. Como demostración palpable de la importancia de la sequía, damos a continuación las utilizaciones obtenidas en los últimos años de nuestra potencia hidroeléctrica instalada:

1934 .....	2.693 horas
1935 .....	2.631 »
1940 .....	2.732 »
1941 .....	2.963 »
1942 .....	3.137 »
1943 .....	3.197 »
1944 .....	2.948 »
1945 .....	2.307 »
1946 .....	3.200 »
1947 .....	3.239 »
1948 .....	3.032 »
1949 .....	2.045 »

Puede observarse la extraordinaria disminución de nuestra utilización hidroeléctrica en los años 1945 y 1949, más acentuada aún de lo que indican esas cifras, pues en los períodos de aguas suficientes muchas centrales han trabajado sin factor de reserva e, incluso, sobrecargas. Referida a esas potencias máximas efectivas, la utilización sería aún menor. Es de destacar que, sobre todo, en 1949, estaban ya en explotación algunos nuevos embalses, como el de Alarcón, el de Las Conchas y el del Ebro, que, indudablemente han contribuido a regular, dentro de la escasez de aportaciones, los respectivos ríos y, además, que las fuertes medidas restrictivas obligando al consumo a acoplarse a las condiciones de producción, han favorecido el que la utilización haya sido la máxima posible, sin que se desperdiciara, apenas, nada de agua, en tanto que en 1934 y 1935 se conseguían utilizaciones muy superiores con excedentes hidráulicos importantes.

De las cifras anteriores se desprende que si la sequía actual se hubiera producido en el período anterior a 1935, hubiera habido necesidad de implantar fuertes restricciones, no obstante considerar aquel período como de absoluta normalidad eléctrica con mucha energía sobrante.

También podemos afirmar (véase Anejo núm. 20) que si en el año 1949 la utilización de nuestras centrales hidráulicas hubiera sido la normalmente prevista, y justificada en el Anejo núm. 11, y que esperamos conseguir en lo sucesivo, no hubieran existido restricciones en este año.

Resulta, pues, claramente demostrado, a nuestro juicio, que la sequía excepcional por que estamos atravesando en la actualidad es la causa fundamental y determinante de las restricciones eléctricas, y para combatirla o aminorarla, ya que, desgraciadamente, nuestro país, como hemos visto, no dispone de grandes posibilidades térmicas, no habrá más remedio que impulsar con toda la rapidez posible el plan de embalses que desarrolla el Ministerio de Obras Públicas, para dar a nuestros ríos la regulación indispensable que permita hacer frente con el mínimo daño a sequías probables del futuro.

## CAPÍTULO V

### LÍNEAS DE INTERCONEXIÓN Y DE TRANSPORTE DE ENERGÍA

Hemos creído oportuno dedicar un capítulo íntegro a examinar este tema, porque con frecuencia se afirma, incluso en esferas competentes, que para resolver el problema eléctrico español haría falta construir y organizar una gran Red Eléctrica Nacional, a semejanza de lo que se ha hecho en otros países, especialmente en Inglaterra, sin tener en cuenta que, como vamos a exponer a continuación, el problema español es, total y fundamentalmente, diferente del de otras naciones y, particularmente, del inglés.

*Clasificación de las líneas eléctricas de alta tensión.*—Como cuestión previa para entrar a examinar el tema de este capítulo, creemos necesario establecer claramente la definición de los tres grupos en que pueden clasificarse las líneas de alta tensión de energía, a los efectos de lo que pudiera llamarse Red Eléctrica Nacional, aunque en algunos casos existan líneas que resulte difícil encuadrarlas en una sola de estas clasificaciones, por su función mixta, en determinadas circunstancias.

1.º *Líneas de transporte*, que son aquellas que dentro de las distintas zonas eléctricas transportan grandes masas de energía desde los grandes sistemas productores térmicos o hidráulicos a los principales centros de consumo.

2.º *Líneas de interconexión*, que son las que sin tener misión específica de transporte unidireccional, enlazan las zonas eléctricas entre sí, con capacidad su-



ficiente para un intercambio importante de energía en ambas direcciones.

3.º *Líneas de distribución*, que, con mayor capacidad, son las que sirven para llegar con la energía desde las subestaciones principales de cada zona a las redes de baja tensión de los abonados.

Los dos primeros grupos de líneas en España están preparados o están preparándose para tensiones de 132 y 220 kV, salvo en la Zona Catalana, en la que se utiliza la tensión de 110 kV. En las grandes líneas de estos dos primeros grupos, que son las que forman el esqueleto de la red primaria nacional, en el aspecto económico y técnico, resulta conveniente que tengan la menor cantidad posible de tomas intermedias, en tanto que en las líneas del tercer grupo, de tensiones inferiores, que generalmente oscilan entre los 3.000 y los 60.000 voltios, es donde se realizan las derivaciones necesarias para abastecer con tensiones escalonadas los mercados diseminados en el área nacional.

#### CARACTERÍSTICAS EN ESPAÑA DE LAS LÍNEAS DE TRANSPORTE E INTERCONEXIÓN.

Como hemos visto en el capítulo II, las posibilidades de energía eléctrica en España están basadas, fundamentalmente, en los sistemas hidráulicos y, en menor proporción, en las centrales térmicas, y ambas fuentes de energía tienen, como denominador común, una localización geográfica rígida, que es lo que caracteriza a nuestra producción, ya que existe solamente pequeño número de centrales térmicas de potencia reducida en los centros de consumo. Ello determinó, como consecuencia, la necesidad de establecer desde un principio importantes líneas de transporte para llevar la energía desde las centrales productoras a los centros de consumo, y estas líneas de transporte forman parte integrante y esencial, tanto como las máquinas generadoras o las redes de los abonados, de los sistemas de las grandes empresas eléctricas, que, en defensa de un interés, deben de atender en todo momento a que estas líneas tengan la capacidad suficiente para cumplir su función de transporte en las mejores condiciones técnicas y económicas. En algunos casos estas líneas pueden transportar energía en ambos sentidos, y realizan en ocasiones auténtico servicio de interconexión.

En cambio, en España las líneas propiamente de interconexión tienen escasa longitud, ya que se reducen prácticamente, por ahora, a las siguientes:

- Interconexión en servicio entre las Zonas Noroeste y Centro-Norte (línea de Puente de San Miguel a Bilbao).
- Interconexión en servicio entre las Zonas Centro-Norte y Catalana (línea de Lafortunada a Seira).
- Interconexión en servicio entre la Zona Centro-Norte y la Centro-Levante (línea de Mudarra, Valladolid a Madrid).
- Interconexión en construcción de la Zona Andaluza con la Centro-Levante (línea entre la central de pie de presa del pantano de Tranco de Beas y la central de Almadenes), que puede considerarse, en cierto modo, como de transporte, por tener como principal finalidad que la Sociedad Riegos de Levante, S. A., pueda tomar en Alicante la energía contratada de la central de Tranco de Beas.
- Interconexión en estudio de la Zona Centro-Levante con Andalucía (línea entre el sistema de Saltos del Tajo, S. A., Cijara y Puertollano, que se completará con la línea en construcción desde Puertollano a Andújar). Estas futuras líneas son, más bien, para el transporte de la energía del Cijara a las empresas concesionarias de Centro-Levante y Andalucía.
- Interconexión en estudio de la Zona Centro-Levante con Cataluña (mediante una línea entre el sistema de Levante y las centrales de Flix y Escatrón).
- Interconexión en estudio de la Zona Andaluza con la Centro-Norte (mediante una línea entre el sistema de Centro-Norte y las centrales de los sistemas del Tajo inferior, Cijara y Puertollano, por un lado, y del Tajo inferior y Sevilla, por otro).

Salvo estas líneas, que pueden considerarse, en cierto modo, como de interconexión; es decir, que salvo las excepciones indicadas, funcionan y funcionarán principalmente para conjugar excesos de energía de una Zona con otra, las restantes grandes líneas hoy existentes del sistema español son, muy predominantemente, líneas de transporte.

La capacidad de las líneas de interconexión exis-



tentes es, en general, suficiente, con pérdidas admisibles para los transvases de energía que ha habido hasta ahora necesidad de hacer entre los sistemas eléctricos, aunque en algunos casos convenga aumentar, tanto aquí como en las líneas de transporte, la potencia de compensadores síncronos para la mejor regulación del voltaje, como ya se realiza, y únicamente la interconexión entre los sistemas Centro-Norte y Cataluña se estimó insuficiente, y por ello, desde principios de 1949, por acuerdo entre la Empresa Nacional del Ribagorzana y UNESA, se está reforzando dicha interconexión con una nueva línea (Argoné-Pont de Suert-Pobla), que construye la primera de dichas entidades. Por otra parte, las empresas eléctricas, al constituir UNESA y en previsión de que en algún momento fuese necesario construir o reforzar líneas de interconexión, sin que a ninguna empresa determinada interesara dicha labor, hicieron constar en los Estatutos de «Unidad Eléctrica, S. A.», como una de sus finalidades, «la construcción de las interconexiones de los sistemas regionales y de éstos con las centrales térmicas necesarias para completar, con las que realicen las empresas aisladamente o agrupadas, la red eléctrica primaria dedicada a conjugar económicamente los medios de producción de energía eléctrica y alimentar, en toda la amplitud de sus necesidades, los centros de consumo de la Nación».

En cuanto a las líneas de transporte, cada sociedad eléctrica ha estudiado y sigue estudiando, como es natural, con el mayor detalle, cuáles son las líneas más convenientes para llevar la energía de sus centros productores a los consumidores, teniendo en cuenta siempre que la demanda del consumo debe cubrirse con el mínimo de gastos y pérdidas, y, por tanto, que la energía ha de utilizarse lo más cerca posible de los centros de producción; es decir, que el producto

energía transportada  $\times$  distancia recorrida

sea el mínimo, lo que ha dado lugar al sistema eléctrico de líneas de transporte español, que resulta perfectamente justificado y racional para las necesidades de hoy y de un futuro próximo, como puede verse en el mapa del Anejo núm. 21, ya que quedan lógicamente unidos los principales centros de nuestra pro-

ducción y consumo, así como debidamente conectados nuestros sistemas térmicos o hidráulicos.

Existe radical diferencia entre los transportes de la energía eléctrica, que se procura siempre que sean los mínimos posible, mediante desplazamientos sucesivos de los bloques de energía y los transportes de otros productos industriales, incluso de los servicios públicos de transporte por ferrocarril y carretera. Estos últimos constituyen una *finalidad*, mientras que el transporte de la energía eléctrica es *instrumental*; es solamente un medio de enlace entre la producción y el consumo. El atribuir a la línea de transporte de energía eléctrica otro papel que el de instrumento, es causa de la deformación que, con frecuencia, experimenta el planteamiento del problema de la Red Eléctrica Nacional.

El problema fundamental de la industria eléctrica consiste, como hemos indicado, en elegir en cada caso el centro de producción que permite obtener el menor coste de la energía y la mejor calidad de servicio en el correspondiente centro de consumo, mediante el transporte más reducido y adecuado.

#### PROYECTOS DE RED ELÉCTRICA NACIONAL DE ESPAÑA.

En diversas ocasiones se ha planteado, erróneamente, a nuestro juicio, el problema de la Red Eléctrica Nacional en España. La primera vez, por la Real Orden de 1918, en un proyecto de Ley propuesto por la Comisión Permanente de Electricidad, que quedó posteriormente en suspenso.

En 1919, en el I Congreso Nacional de Ingeniería, se abordó de nuevo el tema de la Red Eléctrica Nacional. Se nombró una Subcomisión que dibujó una serie de líneas en el plano de España, a las cuales, *más o menos*, debía ajustarse el trazado de la red. Tampoco este estudio pasó de simple propuesta.

Por Real Decreto de 9 abril de 1926 abrió concurso el Ministerio de Trabajo, Comercio e Industria, para la redacción de proyectos de líneas de transporte eléctrico, que, en su conjunto, pudieran constituir una Red Eléctrica Nacional, y en el que se señalaban las bases principales del mismo.

En 1927 preséntanse varios proyectos al concurso anunciado, entre ellos, los pertenecientes a la Cámara Oficial de Productores y Distribuidores de Electricidad y a la entidad Hullera Española. Estos pro-



yectos, debidos a técnicos destacados cuya labor es de encomiar, por las finalidades que se proponían y las informaciones con que entonces contaban, no llegaron a tener realidad; circunstancia afortunada, pues, al examinar hoy día dichos proyectos, se aprecia que hubieran resultado inadecuados a nuestros sistemas de producción, tanto térmicos como hidráulicos, y a la localización de nuestros principales centros de consumo; incluso el estudiado por la Cámara Oficial de Productores y Distribuidores, que era el que más se ajustaba a los sistemas eléctricos entonces existentes.

La llamada Red Eléctrica Nacional, que se perseguía con estos intentos un poco prematuros, está actualmente en vías de irse realizando, al ritmo posible, por la integración de las grandes líneas de transporte y de la interconexión que figuran en el mapa del Anejo núm. 21, en el que puede apreciarse lo lógico de su trazado. Discutir hoy lo que debería ser una Red Eléctrica Nacional, es lo mismo que si discutiéramos ahora si la capital de España debe de estar a orillas del Manzanares o del Tajo.

Es, además, necesario tener presente que el conjunto de líneas primarias de muy alta tensión que permiten los grandes transportes e interconexiones y que vienen a constituir la llamada Red Eléctrica Nacional, no puede hacerse de una vez para siempre, sino que ha de realizarse a medida que entran en servicio nuevos medios productores o se presentan nuevos mercados consumidores, de modo que permita la colocación de la energía en las mejores condiciones posibles. La construcción de grandes líneas de interconexión no proporciona tampoco nuevas cantidades de energía, sino únicamente la posibilidad de aprovechar la que existe, y antes de dedicar inversiones cuantiosas y utilizar materiales, algunos, como los conductores y aisladores, muy escasos en España, y cuya administración exige la mayor cautela, ha de estudiarse detenidamente cuáles son las ventajas que han de reportar las nuevas líneas, tras de considerar que la energía, para que resulte lo más económica posible, ha de consumirse lo más cerca posible del centro de producción, y que los grandes transportes sólo son rentables cuando, por no existir otra solución mejor, cuenten con número elevado de horas de utilización de la potencia que se transmite.

Por otra parte, es lógico, como ya hemos indica-

do anteriormente, que en España, como en todos los países, las nuevas grandes industrias consumidoras de energía se ubiquen, a igualdad de otros factores, en la proximidad de los centros productores, y ello, muy beneficioso para la economía eléctrica y para el precio de la energía por la disminución de pérdidas que representa, que hará cada vez menos necesarios los grandes transportes de energía, visto el problema desde el punto de vista que consideramos.

#### DIFERENCIA FUNDAMENTAL ENTRE EL PROBLEMA ELÉCTRICO EN INGLATERRA Y ESPAÑA.

Para terminar este capítulo, queremos hacer breve referencia al origen en Inglaterra de la Red Nacional o «grid iron», realizada por el Estado, y que algunos han entendido que debía ser ejemplo de lo que ha de hacerse en España.

El problema en Inglaterra, cuando éste se planteó, hace veinticinco años, era fundamentalmente diferente del nuestro, ya que presentaba las siguientes características:

1.<sup>a</sup> Muchas centrales térmicas de muy diversas potencias, situadas en los centros de consumo que utilizaban carbones comerciales, con rendimientos que variaban en una escala muy amplia, según la antigüedad de las mencionadas centrales; algunos, desastrosos para la economía del carbón.

2.<sup>a</sup> Distintas frecuencias en las producciones de energía eléctrica en el país.

3.<sup>a</sup> Tarifas muy diversas, que variaban desde 1.5 d o menos, a más de 3.d de media por Kw-h.

4.<sup>a</sup> Consumos industriales muy concentrados y localizados en la proximidad de las centrales.

5.<sup>a</sup> Carencia de interconexiones importantes entre las centrales en funcionamiento, y que, además, resultaban imposibles en muchos casos por la diversidad de frecuencias.

En estas condiciones y ante la mala utilización con que se quemaba el carbón en centrales que resultaban antieconómicas y la necesidad de unificar las frecuencias, nombró el Ministerio de Transportes, en enero de 1925, un Comité especial para estudiar el problema del suministro de energía, que presentó un informe con las grandes directrices de la política que había que adoptar para asegurar su más eficiente y efectivo desarrollo. Como consecuencia de aquel dictamen,



se votó en el Parlamento inglés, en 1926, la construcción de un vasto sistema de interconexiones entre las centrales térmicas seleccionadas de producción de energía eléctrica existentes en el país, así como se determinó la unión forzosa con la red de interconexión de las nuevas centrales que hubieran de crearse al aumentar la demanda de fluido eléctrico en el mercado. Se encargó al Consejo Central de Electricidad («Central Electricity Board») de la realización y dirección del plan aprobado. Mediante este plan se consiguió utilizar al máximo las centrales de mejor rendimiento, explotándolas en la forma más económica y prescindir de aquella que tenían consumo excesivo de carbón. Al mismo tiempo, como consecuencia de ello, se pudo unificar la frecuencia a 50 períodos, con lo que se obtuvo mayor disponibilidad de fluido eléctrico en la totalidad del país, como resultado de la conjugación, hasta entonces inexistente, de los medios productores. También se facilitaba la industrialización rural, logrando que la tendencia moderna de concentración de los habitantes en las grandes ciudades se corrigiese en lo posible.

Con lo dicho basta para comprender que el problema inglés era fundamentalmente diferente del actualmente planteado en España. La llamada Red Eléctrica Nacional de cualquier país ha de estar basada en líneas de interconexión, y éstas, son tanto más importantes cuanto menores las líneas de transporte; es decir, cuando más cerca están los centros productores de los centros consumidores. En las naciones en que la base de su producción radica en centrales térmicas que queman carbones comerciales en centros de consumo, es lógico que las líneas de transporte tengan importancia mínima, y, por tanto, que las empresas eléctricas no hagan voluntariamente las líneas de interconexión precisas, sino que sea el Estado el que construya estas líneas, bien directamente, o bien mediante una fórmula mixta. En España, por la ubicación rígida de nuestros medios productores, según hemos señalado, las líneas de transporte tienen gran importancia, y, en cambio, son muy reducidas las líneas de interconexión precisas. Éstas se realizarán, con el ritmo y la medida convenientes, por las propias empresas eléctricas, individualmente o a través de UNESA, cumpliendo ésta una de sus finalidades estatutarias, que antes hemos señalado.

Es natural y lógico que los organismos oficiales im-

pulsen, vigilen y aprueben los proyectos y construcción de estas interconexiones, pero creemos que sería desacertado y poco conveniente para la Economía que el Estado, de modo directo, se lanzase unilateralmente a la construcción de grandes líneas de interconexión para dar realidad a una nueva e innecesaria Red Eléctrica Nacional, que, en los momentos actuales, encarecería el coste de la energía, restando materiales y elementos a otras líneas de transporte más necesarias y urgentes de nuestros sistemas eléctricos.

## CAPÍTULO VI

### MEDIDAS ACONSEJABLES PARA LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA ELÉCTRICO

De lo expuesto en los capítulos anteriores pueden deducirse las medidas de carácter general aconsejables a los Poderes Públicos para ayudar a la fácil y rápida solución del problema eléctrico en España. Estas medidas, a nuestro entender, son las siguientes:

1.<sup>a</sup> *Hacer económicamente posible que pueda tener realidad adecuada y oportuna el plan de nuevas construcciones necesarias para atender eficazmente la demanda del mercado español, en cuanto a energía eléctrica se refiere, en tanto existan posibilidades energéticas sin explotar.*

Esta medida es, a nuestro juicio, la primera y fundamental, ya que, al considerar los ingentes capitales de que es necesario disponer en los próximos años para atender las nuevas construcciones, si no se hiciera posible contar con los mismos, el problema eléctrico, lejos de resolverse, se agravará en el futuro, tanto más cuanto el ritmo de las nuevas construcciones sea más lento y las condiciones meteorológicas más desfavorables. La característica fundamental de esta actividad, del crecimiento progresivamente acelerado en la demanda, requiere constante crecimiento en la producción, sin que pueda fijarse como fin, a semejanza de otras industrias, el alcanzar determinado nivel, que, aun en el caso más favorable, en seguida resultaría insuficiente. En el momento actual, las empresas eléctricas han tropezado ya con difícil situación financiera, por la invariabilidad oficial de las tarifas, y es absolutamente preciso, a nuestro juicio, que rá-



pidamente se salven las condiciones económicas actuales que pueden originar retraso en las nuevas construcciones, lo que tendría gravísimas consecuencias dentro de cuatro o cinco años. Para disponer de los medios económicos que necesita esta actividad nacional, sólo hay dos procedimientos: o que aquéllos salgan de la Nación, es decir, de la Hacienda Pública, sin repercusión en las tarifas, o bien que se obtengan del ahorro o capital privado, ya sea directamente o a través de obligaciones del Estado. En el primer caso, habría que estudiar rápidamente qué subvenciones o primas sería preciso acordar a fondo perdido con cargo al presupuesto de la Nación, a las sociedades de iniciativa privada o estatales que acometan las nuevas construcciones eléctricas; en el segundo caso, es preciso, lo antes posible, aprobar unas tarifas de venta de energía suficientemente elásticas y amplias para permitir obtener del ahorro nacional, incluso en coyunturas financieras desfavorables, los capitales precisos para las nuevas construcciones, bien por empresas privadas o estatales, y remunerar a estos capitales con un interés que haga posible su obtención.

Cualquier indecisión o retraso en este aspecto, puede tener gravísimas consecuencias en el futuro.

Ya que la Providencia dotó a nuestro país de posibilidades hidráulicas abundantes, muy superiores a las de la mayoría de los países europeos, tenemos el deber de aprovechar dichas posibilidades con el ritmo preciso para no ocasionar grave e irreparable daño a nuestra Economía.

*2.ª Tratar de coordinar dentro del ámbito de la generación y distribución de energía eléctrica, las actividades paraestatales y las de iniciativa privada.*

Como hemos indicado en capítulos anteriores, existe en la actualidad una doble actividad constructiva por parte del Estado y de las empresas de iniciativa privada. En esta doble actividad constructiva, que debe llevarse con el conveniente acuerdo entre ambas partes, destacan, como es inevitable, facilidades para las empresas paraestatales, ya que éstas, aunque teóricamente funcionan en régimen de empresa privada, de hecho disfrutan de ciertas preferencias en la distribución de cupos de materiales intervenidos, en la exención de impuestos y, en general, en múltiples aspectos. Las empresas de iniciativa privada disfrutan también de protección del Estado; pero, de hecho, sus fa-

cilidades son inferiores a las que obtienen las empresas paraestatales. Si, al mismo tiempo que se registra esta situación de favor, se produce de hecho la de que las empresas estatales acometen obras por su propia iniciativa y con el mejor deseo de ayudar a la Economía nacional, pero que, en algunos casos, pueden ser menos interesantes que otras que, por falta de medios, no pueden acometer las empresas privadas, y, en otros casos, aquellas obras las hubiera acometido la iniciativa particular, en igualdad de condiciones que las empresas paraestatales, se deduce fácilmente la situación que está a punto de comenzar a producirse dentro de la economía eléctrica española, fundamentada hasta hoy en empresas de capital privado, y esta situación de competencia, en unión de las dificultades económicas antes señaladas, resta confianza en los dirigentes y capitalistas sobre el porvenir de las empresas productoras y distribuidoras de energía eléctrica, por no saber claramente hasta dónde ha de llegar la interferencia estatal en la misma y cuáles serán sus consecuencias.

Por esto entendemos muy deseable que, de acuerdo con el criterio repetidamente expuesto desde las más altas esferas de la Nación, de que la iniciativa estatal no ha de interferir con la iniciativa privada, sino ayudarla y colaborar con ella, se concrete cómo ha de llevarse a la práctica esta colaboración y se fijen los términos de la misma dentro del campo eléctrico, para evitar situaciones difíciles para la Economía nacional.

*3.ª Ayudar eficazmente a las empresas dedicadas a la producción de energía eléctrica para que alcancen el pleno desarrollo de sus planes, tanto para aumentar la producción de energía como para disminuir las elevadas pérdidas que de la misma actualmente existen.*

Por la importancia fundamental de la producción de energía eléctrica y por sus especiales características, que hacen que sus fallos se adviertan, amplificados, en la Economía nacional, estimamos imprescindible que se le faciliten todos los medios necesarios para el rápido desenvolvimiento de la producción, distribución y transporte que requiere el incremento incesante de la demanda.

Como punto primordial de esta protección, han de facilitarse, en cantidad y plazo convenientes, las divisas precisas para las importaciones de maquinaria imprescindible que se requiere, sin dejar de fomentar la fa-



bricación nacional de esta maquinaria para que vaya reemplazando, con las calidades y garantías debidas en misión de tal importancia, a las importaciones extranjeras. Estas divisas son, a nuestro juicio, de las mejor invertidas de nuestra Economía, pues, por una parte, su aplicación se encuentra reembolsada, por lo menos, dos veces cada año, por la utilización de la energía en el conjunto de la Nación, y, por otra, nuestra industria puede desenvolverse más rápidamente y hacer innecesarias las importaciones de otros productos que hoy absorben anualmente gran cantidad de las mismas divisas. Igualmente, las empresas productoras y distribuidoras de energía eléctrica, en general, tanto privadas como estatales, deben seguir teniendo preferencia efectiva en los suministros racionados de materias primas indispensables, tales como hierro, cemento, carburantes, etc.

Dentro de esta ayuda y preferencia, ha de prestarse especial atención a los planes en marcha de las empresas eléctricas para la mejora de sus actuales medios de interconexión, transporte y distribución, incluyendo la construcción de nuevas líneas, aumento de capacidad de subestaciones de transformación, instalación de motores síncronos compensadores y mejora y ampliación de las redes de baja tensión, pues todo ello contribuirá muy eficazmente a aumentar las disponibilidades de energía, como consecuencia de la disminución de las importantes pérdidas anormales que ahora tiene el conjunto del sistema eléctrico nacional, según hemos visto en el capítulo II, Anejo número 12.

*4.ª Impulsar en el mayor grado posible el plan de construcción de embalses reguladores de interés hidroeléctrico, que actualmente está realizando y tiene en proyecto el Ministerio de Obras Públicas.*

Dado que nuestra economía eléctrica, como hemos indicado, ha de estar basada fundamentalmente en la utilización de nuestros recursos hidráulicos y que éstos presentan características de gran variabilidad, es indispensable regular lo más rápidamente posible las aportaciones de nuestros ríos mediante la construcción de los embalses correspondientes. Afortunadamente, el planeamiento de estos embalses, e incluso la construcción de muchos de ellos, está en curso de realización por el Ministerio de Obras Públicas; pero el ritmo de estas construcciones, por diversas razones, no es todo lo rápido que necesita nuestra producción de elec-

tricidad, y, por ello, entendemos que deben adoptarse todas las medidas financieras, técnicas, económicas y legales precisas para acelerar los planes en curso y convertirlos en rápida realidad. Para ello, estimamos conveniente que traten de conseguirse acuerdos entre las empresas eléctricas de iniciativa privada y el Ministerio de Obras Públicas para las condiciones de construcción y explotación de estos embalses, pues, así, podrá llegarse a resultados como el conseguido con la construcción del pantano de Alarcón, en el que la Unión Sindical de Usuarios del Júcar, al quedarse con la contrata de la obra, ha hecho posible su puesta en servicio en un plazo reducidísimo, que puede considerarse como un «record», no sólo dentro de España, sino, incluso, de Europa, y que ha mejorado notablemente los riegos y la producción eléctrica de uno de los ríos más interesantes de España.

Dentro del aspecto hidráulico de la producción de energía, creemos también necesario que se dicten aquellas disposiciones legales complementarias de las actuales, para fomentar el más fácil y rápido aprovechamiento integral de nuestros ríos de interés hidroeléctrico, aunque hemos de reconocer que, en este aspecto, se ha hecho ya bastante en los últimos años.

*5.ª Contribuir a regularizar el aprovechamiento hidroeléctrico de nuestros recursos, mediante la repoblación forestal de las cabeceras de los principales ríos o terrenos de fuertes pendientes y la ejecución de las necesarias correcciones de torrentes.*

Esta corrección y repoblación forestal, que hemos tratado con más extensión en el Anejo número 7, es especialmente interesante en las cuencas de recepción de los grandes embalses reguladores para prolongar la vida de su capacidad útil. Pueden facilitarse estos trabajos con la declaración de «zonas de interés forestal», previstas en la Ley de 10 de marzo de 1941 y Reglamento de 30 de mayo del mismo año, para su aplicación.

Estas son las medidas fundamentales, a nuestro juicio, expuestas en orden de importancia, para que el problema eléctrico español se resuelva de modo favorable a nuestra Economía y al porvenir industrial de España.

El Pleno de la Ponencia IV tiene el honor de someter al II Congreso Nacional de Ingeniería, como resumen de este trabajo, las siguientes



## CONCLUSIONES

1.<sup>a</sup> La importancia fundamental que para la Economía del país tiene la producción, transporte y distribución de energía eléctrica y las especiales características generales y específicas de las mismas, aconseja y justifica el que los Poderes Públicos concedan la máxima atención al problema eléctrico actualmente planteado en España.

2.<sup>a</sup> La producción de energía eléctrica estimada como posible, al ponerse en explotación, en momento oportuno, todos los recursos naturales de nuestro país, permitirá atender normalmente la demanda creciente del mercado nacional, tanto en energía como en potencia, durante un período algo superior a veinte años, contados a partir del presente.

3.<sup>a</sup> Las empresas dedicadas a la producción de energía eléctrica debidas a la iniciativa privada, han atendido cumplidamente desde principio de siglo las necesidades eléctricas nacionales hasta 1944, en que se presentan las primeras restricciones conocidas, no obstante haber puesto en marcha para evitarlas, cuatro años antes, unos vastos planes de nuevas construcciones, cuya importancia no tiene precedentes en nuestra vida industrial. Estos planes han sido reforzados últimamente con los de las empresas de iniciativa paraestatal, y están en gran parte realizados o en curso de inmediata realización, y, si no han podido hasta ahora resolver satisfactoriamente el problema eléctrico nacional, ha sido debido a diferentes causas y, muy especialmente, a la sequía anormal y extraordinaria que padece Europa, y, en particular, España, desde 1944.

4.<sup>a</sup> El conjunto del sistema nacional de líneas primarias de transporte y de interconexión, en una gran parte en explotación o en construcción avanzada, y en otra en proyectos previstos para el momento oportuno, constituye para España, en la actualidad, la solución adecuada y conveniente para permitir realizar los intercambios de energía que se precisan para el aprovechamiento integral de nuestros recursos energéticos en explotación. Cuando la puesta en servicio de nuevos medios productores o la entrada de nuevos mercados consumidores lo precisen, deberán proyectarse y construirse las nuevas líneas primarias que vayan siendo necesarias, por lo que resulta poco conveniente, a juicio de la Ponencia, intentar desbordar este lógico ritmo constructivo de nuevas líneas primarias, con

una Red Eléctrica Nacional de nueva creación, que, superponiéndose a lo que actualmente existe, intentase resolver, con carácter definitivo, lo que, para que tenga plena eficacia, ha de resolverse con el ritmo adecuado.

5.<sup>a</sup> Las medidas aconsejables a los Poderes Públicos para la resolución del problema eléctrico, a juicio de esta Ponencia, son las siguientes:

a) Hacer económicamente posible que pueda tener realidad adecuada y oportuna el plan de nuevas construcciones necesarias para atender eficazmente la demanda del mercado español, en cuanto a energía eléctrica se refiere, en tanto existan posibilidades energéticas sin explotar, y tratando de conservar en todo momento una proporción razonable entre la potencia termoeléctrica utilizable y la hidroeléctrica total.

b) Coordinar, dentro del ámbito de la generación y distribución de energía eléctrica, las actividades paraestatales y las de iniciativa privada.

c) Ayudar eficazmente a las empresas dedicadas a la producción de energía eléctrica para que alcancen el pleno desarrollo de sus planes, tanto para aumentar la producción de energía, como para disminuir las elevadas pérdidas que de la misma actualmente existen.

d) Impulsar, en el mayor grado posible, el plan de construcción de embalses reguladores de interés hidroeléctrico que actualmente está realizando y tiene en proyecto el Ministerio de Obras Públicas.

e) Contribuir a regularizar el aprovechamiento hidroeléctrico de nuestros recursos, mediante la repoblación forestal de las cabeceras de los principales ríos o terrenos de fuertes pendientes y la ejecución de las necesarias correcciones de torrentes.

---

### ANEJO NÚM. 1

Philip Sporn, Presidente de la American Gas and Electric Service Corporation y del Comité de Cooperación entre la industria eléctrica y de la Comisión de Energía Atómica, en un informe presentado a la Asociación Nacional del Carbón, trata de «Las perspectivas de la aplicación industrial de la energía atómica»; tema acerca del cual expresa que no existen todavía bases sólidas suficientes para determinar concretamente lo que dicha nueva fuente de energía ha de representar para la Humanidad, al menos, en corto plazo.



La indeterminación proviene de que hay todavía dos incógnitas sin cuyo conocimiento no es posible establecer cálculos económicos. Son éstas, el costo a que resultará el combustible nuclear en el futuro y el de establecimiento de una central productora de energía eléctrica, en la que el carbón haya sido substituído por uranio 235 o plutonio.

En la actualidad se están desarrollando trabajos experimentales, para lo que en los Estados Unidos se han destinado enormes sumas en busca del perfeccionamiento de los reactores nucleares. De resolverse satisfactoriamente, desde el punto de vista práctico, el proceso, hoy en estudio, de obtener más combustible nuclear del que se consume en un reactor al romper el átomo de uranio por medio de los «reactores nodriza» (Breeder), dado que un kilogramo de uranio 235 puede substituir a 3.000 Tm. de carbón, habríamos llegado al caso de la hulla blanca, cuyo precio es, prácticamente, cero.

En cuanto a las estimaciones del coste de establecimiento de una central atómica, las opiniones autorizadas dan cifras posibles entre 140 y 1.000 dólares por Kw. de potencia. Una proporción de siete a uno. Límites que quizás no cubran, con todo, el campo de posibilidades.

Es, pues, cierto que si algún día se alcanza el límite de coste inferior o se rebaja éste, la energía atómica tendrá significación económico-social. Aun sin llegar a dicho límite, puede suponer valiosa significación en lugares remotos de los centros en que se dispone de energía térmica o de hidráulica. En caso contrario, es decir, cerca del límite superior, es poco probable que la energía atómica encontrara aplicación fuera del campo militar, en el que los gastos no cuentan.

Hay razones para creer que algún día «quemaremos» en la industria «combustible nuclear», pero desconocemos el tiempo que será preciso transcurra para llegar a ello.

Hay paralelismo entre un hogar en el que se quema carbón, que reacciona químicamente con el oxígeno, y un reactor nuclear en el que se quema uranio 235 o plutonio, mediante neutrones. En ambos casos el calor producido puede utilizarse para vaporizar el agua o calentar un gas que accione un turbo-generador.

Las cenizas obtenidas de la combustión del carbón

y los gases evacuados de los hogares, plantearon problemas de importancia que tuvo que resolver la técnica, pero son de muy poca monta si se los compara con los que derivan de los materiales y gases radiactivos resultantes de la fisión nuclear. Estos son de extremada complejidad, y para ellos aún no se conocen soluciones satisfactorias.

Para elevar la eficiencia de las turbinas de vapor, pasando de las presiones de 84 Kgs. a las de 168 Kgs., y de las temperaturas de 240 grados a las de 565 grados, ha necesitado la técnica veinte años, y fué preciso obtener nuevos materiales especiales. Las especificaciones que requieren los de un reactor nuclear han de ser muy severas al estar expuestos y tener que resistir el bombardeo de neutrones, que no deben absorber, y a las radiaciones propagadas en el proceso de desintegración atómica. Lógico es suponer que las dificultades en este caso han de ser mayores que las que se presentaron en las turbinas.

Hace un año, el Comité general asesor de la Comisión de Energía Atómica, al que pertenecen científicos como Conant, Oppenheimer, Fermi y Rabí, expresó la opinión siguiente:

«Si las hipótesis sentadas respecto al coste del uranio y a la viabilidad de solución del proceso «Breeding» son desfavorables, los resultados serán que la energía atómica no podrá competir en los EE. UU. con la energía carbonífera, excepto en las regiones en las que el transporte del combustible desde la mina sea factor decisivo de costo. Si dichas hipótesis son favorables, la energía atómica podrá compararse con la carbonífera e incluso resultar a más bajo precio, en cuanto al coste del combustible se refiere. Actualmente no existen suficientes bases para decidir entre ambas posibilidades, pero, en todo caso, puede asegurarse que el costo de una central atómica será notablemente superior al de una térmica de carbón de capacidad similar.

Aun bajo las hipótesis más favorables respecto al desarrollo técnico nuclear, no vemos manera de que, en parte considerable, pueda substituirse el presente suministro mundial de potencia por la energía nuclear antes de transcurridos veinte años.»

Mr. Sporn resume los conceptos vertidos en su informe, opinando que la primera fase del desenvolvimiento técnico de la energía atómica (exclusivamente experimental), llevará de tres a cinco años. Transcurridos otros tres a cinco años (es decir, de seis a diez),



quizá pueda contarse con un reactor destinado a producir energía eléctrica. Cuatro o cinco años más tarde (es decir, al cabo de diez a quince), es posible se disponga de alguna generación de energía atómica ya comercial, pero comercial sólo en sentido de funcionamiento más o menos regular. Pero el hecho de que puedan resolverse los imponderables hasta el punto de que la energía nuclear compita con la carbonífera, no puede imaginar que suceda antes de quince o veinte años, y más bien antes de los veinticinco o quizás más.

#### ANEJO NÚM 2

M. Pierre Ailleret, Director del Servicio de Estudios e Investigación de la Electricidad de Francia, en un artículo publicado en el «Bulletin de la Société française des Electriciens» (abril, 1948), con el título «L'Évolution Probable de la Production et de la Distribution de l'Énergie Électrique», trata, entre otras cuestiones, de que la estructura de toda la industria eléctrica está influida por la característica de la constante progresión de la demanda de energía desde los mismos orígenes de la industria.

Tal ritmo de crecimiento es una progresión geométrica, cuya razón hace que se duplique la energía producida cada diez años.

Ya es bastante notable que una tal progresión se mantenga en un intervalo de tiempo tan considerable, pero es un hecho que entre una y otra década, los consumos mundiales de energía eléctrica se duplican. Tanto las crisis como los «booms» económicos, se revelan en las líneas de tendencia por ligeros dientes. Las guerras provocan, temporalmente, según el país, bien progresiones rápidas, bien regresiones, pero la tendencia general permanece invariable.

Este crecimiento ha sido considerado en cada época, en cuanto a las perspectivas de su prolongación. Reiteradamente se pusieron en evidencia razones según las cuales era de esperar un período de saturación: fin del desarrollo de la electrificación tranviaria, fin de las ampliaciones de redes de zonas no abastecidas, saturación del servicio a los productores autónomos, etc. Hasta la actualidad, no obstante, estas previsiones fracasaron ante las cifras de consumo.

Para contestar a la pregunta de si en el futuro hemos de esperar suceda lo mismo, es lo más oportuno es-

tudiar el desarrollo de los consumos en el mundo entero, pero no globalmente, sino considerando país por país.

Al examinar las curvas de crecimiento a largo plazo, relativas a países de distinta estructura económica, por un lado los de gran desarrollo industrial y por otro aquellos en los que el consumo por habitante se mantiene en cifras mínimas, se observa que, a pesar de la gran diferencia entre los niveles de consumo de diversos países, la pendiente de las curvas es poco más o menos la misma; la correspondiente a un incremento del 6 al 7 por 100 anual.

De presentarse una saturación del consumo a partir de cierto grado de desarrollo, se hubiese observado inflexión de las curvas de los países cuyo consumo por habitante es más fuerte, y falta de tal inflexión en las correspondientes a los países con menor evolución económica. Pero no hay nada que pruebe que se alcanzó la saturación, incluso en los países más avanzados en consumo.

Estas comprobaciones pueden realizarse, además, no sólo entre distintos países, sino comparando regiones diferentes de una misma nación. Tal es el caso de Francia, por ejemplo, en donde el ritmo de crecimiento es el mismo en las regiones típicamente industriales, como la del Norte de París, que en las de carácter esencialmente rural.

En Estados Unidos, igualmente, si se comparan grandes regiones en intervalos de tiempo suficientes, los ritmos de aumento difieren poco de un caso a otro, no obstante la diversidad de situaciones y desarrollo de las industrias de guerra.

#### ANEJO NÚM. 3

### CAPITAL INVERTIDO EN LA INDUSTRIA DE PRODUCCIÓN, DISTRIBUCIÓN Y TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ESPAÑA Y EN OTROS PAÍSES

Para la estimación del capital invertido en España en la industria de producción y distribución de energía eléctrica, se ha partido de los datos de los anuarios financieros y de la evaluación de las pequeñas sociedades y particulares que no figuran en dichos anuarios.



Se han obtenido las siguientes cifras para el año 1945:

ACCIONES (Desembolsado y pequeños empresarios) .....	4.482 millones de ptas.
OBLIGACIONES .....	1.867 » »
TOTAL .....	6.319 millones de ptas.

Añadiendo a esta cifra la inversión realizada en los años posteriores, de mucha importancia, especialmente en los años 1946 y 1949, resulta, a últimos de 1949, como capital desembolsado para la industria de producción y distribución de energía eléctrica en España, cifra del orden de 9.200 millones de pesetas.

Los capitales invertidos en la industria eléctrica en otros países es difícil de obtener, ya que, en muchos casos, no figuran concretamente en las publicaciones de que disponemos. Sin embargo, con cierta aproximación y, en algunos casos, por métodos indirectos, se han podido estimar los capitales invertidos en la industria eléctrica en varios países, en algunos de los cuales cabe admitir la posibilidad de que, en todo o en parte, se haya efectuado una revalorización de su inmovilizado. Citamos a continuación las cifras respectivas que hemos obtenido, así como también la potencia instalada y y precio resultante del Kw. instalado. Insertamos, asimismo, los valores correspondientes a España.

Aun cuando estas cifras sean, en algunos casos, aproximadas y sujetas a revisión, demuestran cumplidamente la gran importancia de los capitales que se invierten en esta industria en todos los países.

País	Capital	Potencia instalada en miles de Kw.	Precio medio del Kw.
Francia .....	700.000 millones de francos franceses.	7.900	88.600 francos franceses.
Suiza .....	3.220 millones de francos suizos.	2.450	1.310 francos suizos.
Portugal .....	3.338 millones de escudos.	523	6.380 escudos.
EE. UU. ....	27.600 millones de dólares.	61.166	450 dólares.
España .....	9.200 millones de pesetas.	2.493	3.690 pesetas.

#### ANEJO NÚM. 4

#### POSIBILIDADES ELÉCTRICAS DE ESPAÑA

*"La energía eléctrica en España", por D. Enrique Uriarte, Ingeniero de Caminos.—Artículo publica-*

*do en la "Agenda Financiera" del Banco de Bilbao, en noviembre de 1949.*

El autor, después de ligera historia de la energía eléctrica en España, examina con la mayor meticulosidad la situación actual, y pasa después al estudio del porvenir de la producción y consumo de electricidad.

Dedica un apartado a las posibilidades de producción. Sin entrar en detalles, especifica que, partiendo de la producción del año 1947, las posibilidades totales de producción térmica en España son de 2.977,6 millones de Kw.-h.

A continuación, y también sin especificar cómo ha llegado a las cifras que cita —considerando que es el suyo un artículo muy comprimido por estar incluido en una Agenda bancaria, como ya se ha indicado—, da como disponibilidades hidroeléctricas en España, admisibles económicamente, la cifra de 28.000 millones de Kw.-h. en año normal, lo que —sigue diciendo— representa alrededor del 30 % del potencial hidráulico de España. De estas posibilidades —continúa diciendo el señor Uriarte— el 75 % puede aceptarse como factible al mejorar las tarifas, y el otro 25 % necesitará remuneración bastante superior. En conjunto, pues, las disponibilidades totales de España representan una cifra de 30.977 millones de Kw.-h.

*"Apuntes sobre el futuro eléctrico español", por don Antonio Martínez Cattaneo, Ingeniero de Caminos. Artículo publicado en la "Revista de Obras Públicas" del mes de junio de 1949.*

Empieza su artículo el autor, basándose en los estudios realizados por D. Pedro M. González Quijano, del Ministerio de Obras Públicas, en su «Avance para una valoración de la energía hidráulica de España», publicado en el año 1932.

Superando las utilizaciones actuales a base de un mejoramiento de nuestras redes de interconexión y transporte de energía con posibilidades de compensaciones estacionales entre zonas de distinto régimen, al par de un mejoramiento en la utilización industrial y doméstica de la energía eléctrica, estima que se puede llegar a utilizaciones muy elevadas, incluso del orden de 4.500 horas. Con este supuesto, el aprovechamiento integral de los ríos españoles puede proporcionar, según el autor, energía anual aproximadamente de 37.000 millones de Kw.-h.



En cuanto a las centrales térmicas alimentadas por carbón, se estima que no podrán superarse económicamente los 3.000 millones de Kw.-h.

En total, pues, supone el Sr. Martínez Cattaneo una producción máxima previsible del orden de los 40.000 millones de Kw.-h.

A continuación, el autor entra en consideraciones respecto al alcance de las citadas posibilidades de producción, considerando, a la vez, el crecimiento vegetativo de la población de España, y dando como límite el año 1985.

*"La industria eléctrica en la industrialización de España", por D. José Luis Redonet Maura, Ingeniero Industrial y Director de UNESA.— Estudio incluido en el trabajo presentado en las II Jornadas de Ingeniería Industrial en mayo de 1949 y posteriormente recogido en la "Revista de Ciencia Aplicada", en el número de noviembre-diciembre del mismo año.*

Empieza su estudio el Sr. Redonet citando por orden cronológico las principales evaluaciones que se han hecho del potencial hidroeléctrico de España, y hace especial mención de que las cifras generalmente dadas por los especialistas, se referían a valores teóricos; se estiman los prácticos aprovechables en cantidades muy inferiores, y se observa, además, que van aumentando los valores de estimación a medida que transcurre el tiempo, por un más completo conocimiento de las cuentas y caudales. El autor fundamenta su estudio partiendo de las potencias actualmente instaladas en las distintas cuencas. A éstas añade las de las obras en construcción, de características perfectamente determinadas. A continuación añade la energía aproximada que habrá de instalarse en las centrales de pie de presa en los embalses en construcción o en proyecto, y, como último sumando, la potencia de las concesiones cuya petición se ha hecho oficialmente en el «Boletín Oficial del Estado» y la correspondiente a los estudios de cada una de las principales sociedades de producción de energía eléctrica en las cuencas en que actúan, para el caso en

que se llegue al aprovechamiento integral de los ríos. El conjunto de estos datos, referidos al 31 de diciembre de 1948, arroja las siguientes partidas:

	Kw.
—Potencia instalada ... ..	1.753.350
—En construcción ... ..	1.359.148
—Proyectos de pie de presa de embalses...	341.996
—Concesiones y estudios ... ..	5.536.500
<b>TOTAL GENERAL ... ..</b>	<b>8.990.994</b>

La cifra obtenida, aproximadamente, de 9 millones de Kw., corresponde al potencial hidroeléctrico práctico de España estimado por el señor Redonet; cifra muy superior a las determinadas con anterioridad.

A continuación, el autor estudia las posibilidades de producción del potencial hidroeléctrico práctico obtenido, estimando que, en la actualidad, una producción de 3.100 horas anuales constituye un máximo de utilización hidroeléctrica.

Posteriormente, admite la posibilidad de que se llegue a una utilización normal del orden de 4.000 horas. Aplicando ambos límites, obtiene para la primera utilización, 27.900 millones de Kw.-h, y para la segunda, 36.000 millones de Kw.-h.

Como cifra intermedia prudencial de producción anual posible, cuando ya esté agotado el plan de construcciones hidráulicas, admite el Sr. Redonet la cifra de 32.000 millones de Kw.-h de producción anual.

A continuación, el autor estudia con mucho detalle las posibilidades de producción termo-eléctrica de España, analizando producciones de carbón y posibilidades de instalación de centrales térmicas en cada una de las cuencas carboníferas, y llega, finalmente, a la conclusión, después de considerar las utilizaciones normales en las varias clases de centrales, de que la producción tope admisible en nuestras posibilidades térmicas normales es del orden de 2.900 millones de Kw.-h. Así, pues, en conjunto, las posibilidades térmicas e hidráulicas, según el Sr. Redonet, son, en valores prácticos, de 34.900 millones de Kw.-h al año, con lo cual cree que podría abastecerse el mercado nacional para un período de hasta dentro de unos veinticinco años.



CAUDALES MÁXIMOS Y MÍNIMOS REGISTRADOS EN  
EL PERÍODO 1941-1948

Río	Estación de aforo	Caudal máximo m³/s.	Caudal mínimo m³/s.	Índice extremo
Guadalimar ... ..	Ariza	641,0	0,0	Inf.
Rivera de Huelva.	Gergal	307,0	0,0	Inf.
Alberche ... ..	Burguillo	1.420,0	0,1	14.200
Esla ... ..	Bretó	2.425,0	0,2	12.125
Duero ... ..	Tordesillas	2.200,0	1,4	1.571
Guadalquivir ... ..	Peñaflor	5.616,0	6,8	826
Navia ... ..	Doiras	1.085,0	3,2	339
Mijares ... ..	Villarreal	234,0	1,1	213
Tajo ... ..	Bolarque	1.036,0	5,0	207
Cabriel ... ..	Víllora	555,0	3,2	173
Ebro ... ..	Quintana	903,0	5,4	167
Júcar ... ..	Alarcón	260,0	2,1	124
Gállego ... ..	Anzánigo	309,6	3,9	79
Segre ... ..	Lérida	524,0	8,5	62
Júcar ... ..	Cortes	775,0	14,9	52
Noguera-Pallaresa...	Pobla	255,0	5,6	46
Cabriel ... ..	Cofrentes	361,0	10,0	36

RELACIÓN DE EMBALSES ESPAÑOLES EN EX-  
PLOTAÇÃO, EN CONSTRUCCIÓN Y EN PRO-  
YECTO

En el mapa y cuadros adjuntos figura una relación detallada por Cuencas Hidrográficas de los embalses en explotación, en construcción y en proyecto. El número total de dichos embalses asciende a 221, y su capacidad total a 27.596 millones de metros cúbicos. La potencia de los aprovechamientos de las centrales de pie de presa de dichos pantanos, supondrá 2.744.472 Kw, y la energía anual producible en los mismos, una cifra de 8.457 millones de Kwh, que ha de acomodarse, en parte, a las necesidades de los riegos, a los que atienden, con carácter preferente, una mayoría de dichos embalses.

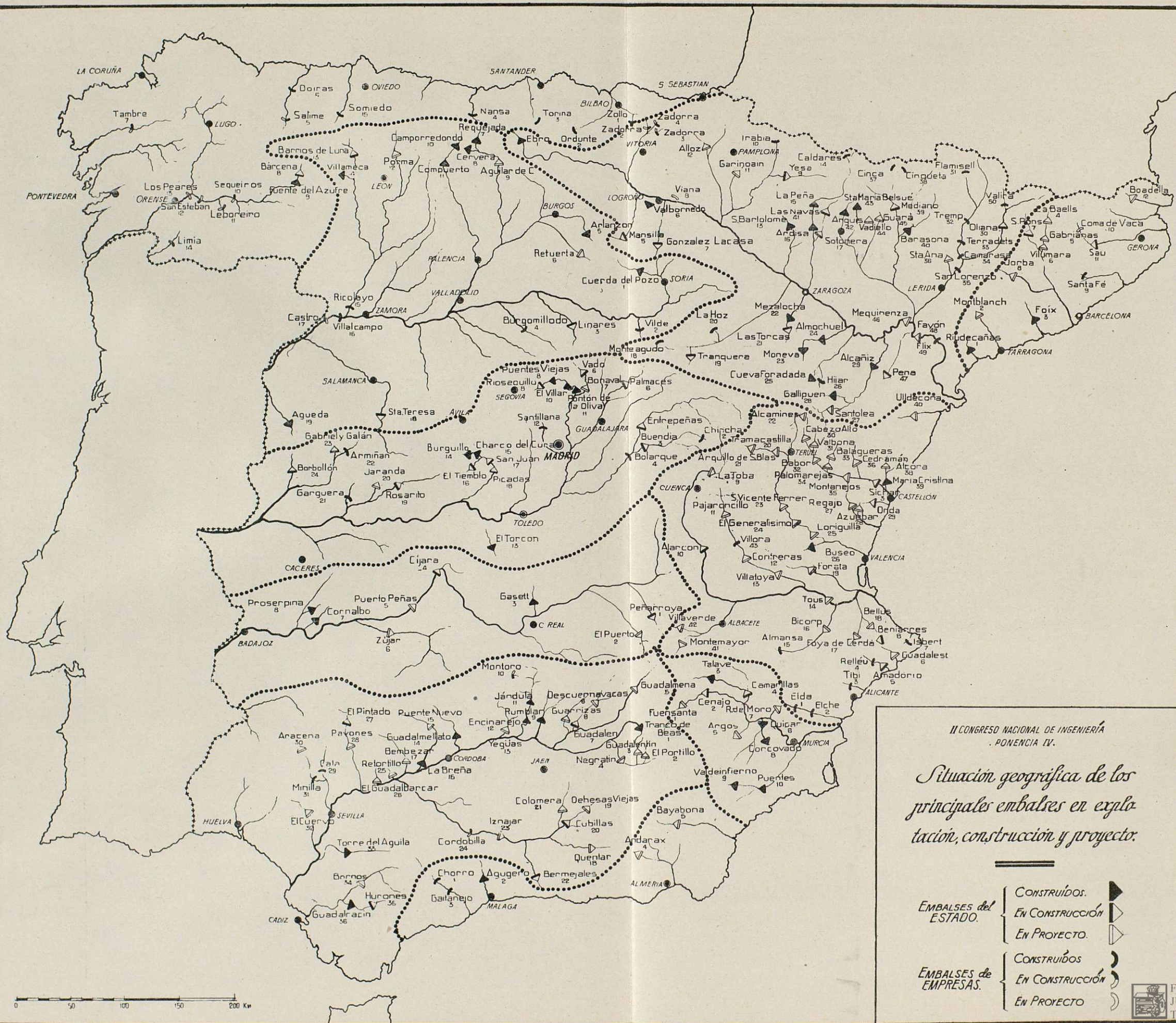
La ejecución de los embalses se indica en los cuadros con la inicial, según estén en explotación, construcción o proyecto.

## Cuenca del Norte de España

N.º	Pantano	Río	Propietario	Capacidad millones m³	Potencia Kw	Energía anual 10⁶ Kwh	Ejecu- ción	Fecha prevista termina- ción
1	Zollo (1)	Larrumbe	Ayuntamiento Bilbao	0,4	—	—	E.	
2	Ordunte (1)	Ordunte	Idem	22,0	—	—	E.	
3	Torina	Torina	E. de Viesgo	11,8	18.000	25,0	E.	
4	La Cohilla	Nansa	S. del Nansa	11,4	14.300	65,0	C.	1950
5	Salime	Navia	H. C. y E. V.	270,0	100.000	350,0	C.	1954
6	Doiras	Navia	E. de Viesgo	87,2	43.200	160,0	E.	
7	Tambre	Tambre	Gallega Elect.	30,0	18.000	60,0	C.	1950
8	Bárcena	Sil	Estado	173,0	30.900	75,0	C.	1955
9	Fuente del Azufre	Sil	Estado	0,5	6.000	24,0	E.	
10	Sequeiros	Sil	S. del Sil	6,1	18.000	80,0	C.	1951
11	Leboreiro	Mao	Gallega Elect.	3,3	1.920	5,0	C.	1947
12	S. Esteban	Sil	S. del Sil	194,0	210.000	900,0	C.	1955
13	Los Peares	Miño	FENOSA	185,0	144.000	350,0	C.	1953
14	Las Conchas	Limia	FENOSA	76,7	24.000	118,0	E.	
15	Somiedo	Somiedo	H. Cantábrico	6,0	16.800	70,0	E.	

(1) Abastecimiento.











### Cuenca del Pirineo Oriental

N.º	Pantano	Río	Propietario	Capacidad millones m. <sup>3</sup>	Potencia Kw.	Energía anual 10 <sup>6</sup> Kwh	Ejecución	Fecha prevista terminación
1	Riudecañas	Riudecañas	Estado	3,3	—	—	E.	
2	Montblach	Francolí	Estado	40	—	—	P.	
3	Foix	Foix	Estado	6,2	—	—	E.	
4	La Baells	Llobregat	Estado	41,7	4.250	15,0	P.	
5	Cabrianas	Llobregat	Estado	46,8	—	—	P.	
6	Vilumana	Llobregat	Estado	7,4	—	—	P.	
7	San Pons	Cardoner	Estado	—	1.400	5,0	C.	1954
8	Jorba	Noya	Estado	9,4	—	—	P.	
9	Santa Fe	R. Gualba	Capmany	—	2.000	5,0	E.	
10	Coma de Vaca	Fresser	H. <sup>a</sup> Fresser	11,7	3.200	15,0	P.	
11	Sau	Ter	Estado	189	18.000	44,0	C.	1952
12	Boadella	Muga	Estado	11,7	1.020	4,8	P.	

### Cuenca del Ebro

N.º	Pantano	Río	Propietario	Capacidad millones m. <sup>3</sup>	Potencia Kw.	Energía anual 10 <sup>6</sup> Kwh	Ejecución	Fecha prevista terminación
1	Ebro	Ebro	Estado	540,0	35.000	60,0	E.	
2	Zadorra (Urrunaga)	Sta. Engracia	S. Zadorra	66,7	14.000	212,0	C.	1955
3	Zadorra (Ulibarri)	Zadorra	S. Zadorra	133,5	14.000	212,0	C.	1955
4	Zadorra (Amatis)	Amatis	S. Zadorra	1,4	24.000	142,0	C.	1955
5	Mansilla	Najerilla	Estado	67,7	3.000	8,0	C.	1953
6	Valborno (antes Amós Salvador)	Lechugo	Estado	0,5	—	—	E.	
7	González Lacasa (antes Ortigosa)	Albercos	Estado	28,7	900	3,0	C.	1951
8	Viana	Barranco	Estado	1,2	—	—	E.	
9	Yesa	Aragón	Estado	470,0	32.000	30,0	C.	1954
10	Irabia	Irati	El Irati, S. A.	13,5	3.000	7,5	E.	
11	Carinoain	Cidacos y Cem-borain	Estado	10,0	—	—	P.	
12	Alboz	Salado	Estado	72,0	8.400	24,0	E.	
13	S. Bartolomé	Arba	Estado	6,1	—	—	E.	
14	Ibónes Caldarés	Caldarés	ElASA	11,5	6.850	25,0	E.	
15	La Peña	Gállego	Sin. Rg. Pt. <sup>a</sup> La Peña	25,0	—	—	E.	
16	Ardisa	Gállego	Estado	10,0	2.600	8,0	E.	
17	Sotonera	Sotón	Estado	184,0	—	—	C.	1955
18	Monteagudo	Barranco	Estado	4,5	—	—	E.	
19	La Tranquera	Piedra	Estado	84,2	—	—	C.	1954
20	La Hoz	Barranco	Estado	0,1	—	—	E.	
21	Las Torcas	Huerva	Estado	7,6	—	—	E.	
22	Mezalocha	Huerva	Estado	4,0	—	—	E.	
23	Moneva	Aguas Vivas	Estado	9,8	—	—	E.	
24	Almocheu	Aguas Vivas	Estado	1,1	—	—	E.	
25	Cueva Foradada	Martín	Estado	29,0	—	—	E.	
26	Híjar	Ecurriza	Estado	3,5	—	—	E.	
27	Santolea	Guadalope	Estado	40,0	1.400	4,0	E.	
28	Gallipuen	Guadalopillo	Estado	3,5	—	—	E.	
29	Estanca Alcañiz	Guadalope	Estado	8,5	—	—	C.	
30	Oliana	Segre	Estado	98,0	16.000	54,0	C.	1951
31	Lagos Flamisell	Flamisell	E. E. Cataluña	50,0	39.500	75,0	E.	
32	Tremp	Noguera - Pallaresa	R. F. del Ebro	209,1	30.000	142,0	E.	
33	Terradets	Idem	R. F. del Ebro	23,2	32.500	72,0	E.	
34	Camarasa	Idem	R. F. del Ebro	112,6	56.000	189,0	E.	
35	San Lorenzo	Segre	R. F. del Ebro	3,4	8.000	44,0	E.	
36	Santa Ana	Noguera - Ribagorçana	Estado	240,9	14.000	78,0	P.	
37	Ibónes Cinca	Cinca	Iberduero	1,2	60.000	1,2	E.	
38	Ibónes Cinqueta	Cinqueta	Iberduero	0,5	—	4,0	E.	



N.º	Pantano	Río	Propietario	Capacidad millones m. <sup>3</sup>	Potencia Kw.	Energía anual 10 <sup>6</sup> Kwh	Ejecución	Fecha prevista terminación
39	Mediano	Cinca	Estado	313,0	25.800	85,0	C.	1955
40	Barasona	Essera	Estado	71,0	22.400	95,0	C.	
41	Las Navas	Astón	Estado	2,2	—	—	E.	
42	Arguís	Isuela	Estado	2,7	—	—	E.	
43	Santa M. <sup>a</sup> Belsué	Flumen	Estado	11,0	—	—	E.	
44	Vadiello	Guatizalema	Estado	14,3	—	—	P.	
45	Guara	Galeón	Estado	2,5	—	—	P.	
46	Mequinenza	Ebro	Estado	1.000,0	150.000	400,0	P.	
47	Pena	Pena	Estado	18,5	—	—	E.	
48	Fayón	Ebro	Estado	20,0	70.000	200,0	P.	
49	Flix	Ebro	R. F. Ebro	4,2	40.500	153,0	E.	1958
50	Escaldes	Valira	F. H. Andorra	5,0	24.000	60,0	E.	

### Cuenca del Júcar

N.º	Pantano	Río	Propietario	Capacidad millones m. <sup>3</sup>	Potencia Kw	Energía anual 10 <sup>6</sup> Kwh	Ejecución	Fecha prevista terminación
1	Elda	Vinalopó	Con. Rg. Elda	0,2	—	—	E.	
2	Elche	Vinalopó	Con. Rg. Elche	0,4	—	—	E.	
3	Tibi	Monegre	Sin. Rg. Alicante	4,0	—	—	E.	
4	Relleu	Relleu	Con. Rg. Villajoyosa.	0,6	—	—	E.	
5	Amadorio	Amadorio	Estado.	12,3	—	—	C.	1955
6	Guadalest	Callosa	Estado.	12,0	—	—	P.	
7	Isbert	Girona	Concesionario	0,8	—	—	E.	
8	Beniarrés	Serpis	Estado	28,0	3.000	10,0	C.	1952
9	La Toba	Júcar	Estado	40,0	—	—	P.	
10	Alarcón	Júcar	Estado	1.100,0	14.720	32,0	C.	1950
11	Pajaroncillo	Cabriel	Estado	240,0	8.500	25,0	P.	
12	Contreras	Cabriel	Estado	850,0	40.000	90,0	P.	
13	Villatoya	Cabriel	Estado	58,0	15.000	45,0	P.	
14	Tous (Sol. A.)	Júcar	Estado	20,0	15.000	40,0	P.	
	Tous (Sol. B.)	Júcar	Estado	46,0	22.000	68,0	P.	
15	Almansa	Grande	Sin. Rg. P.º. Almansa	4,0	—	—	E.	
16	Bicorp	Cazuma	Estado	2,0	—	—	P.	
17	Foya de Cerdá	De los Santos	Estado	7,7	—	—	P.	
18	Bellús	Albaida	Estado	20,0	—	—	P.	
19	Forata	Magro	Estado	31,5	—	—	P.	
20	Tramasastilla	Guadalaviar	Estado	8,7	1.104	2,2	P.	
21	Arquillo de San Blas	Guadalaviar	Estado	21,9	4.800	7,0	P.	
22	Alcamines	Alfambra	Estado	31,3	2.208	3,0	P.	
23	Ean Vicente Ferrer	Turía	Estado	400,0	15.000	40,0	P.	
24	Generalísimo	Turía	Estado	238,0	20.000	50,0	C.	1950
25	Loriguilla	Turía	Estado	20,0	10.000	20,0	P.	
26	Buseo	Chera	Estado	7,5	—	—	E.	
27	Regajo	Palancia	Estado	6,4	—	—	P.	
28	Azuébar	Azuébar	Estado	9,5	—	—	P.	
29	Onda	Veo	Estado	1,0	—	—	C.	1951
30	Cabezo Alto	R. Af. Mijares	Estado	1,0	—	—	P.	
31	Valbona	Mijares	Estado	0,1	—	—	P.	
32	Babor	Mijares	Estado	9,5	1.500	4,0	P.	
33	Balagueras	R. Af. Mijares	Estado	0,1	—	—	P.	
34	Palomarejas	Palomarejas	Estado	30,0	4.000	10,0	P.	
35	Montanejos	Mijares	Estado	24,0	30.500	9,0	P.	
36	Cedraman	Palomarejas	Estado	25,0	—	—	P.	
37	Sichar	Mijares	Estado	55,0	5.000	16,0	C.	1952
38	Alcora	Lucena	Estado	1,1	—	—	P.	
39	María Cristina	R. la Viuda	Estado	23,0	—	—	E.	
40	Ulldecona	Cenia	Estado	12,0	—	—	C.	1955
41	Montemayor	San Pedro	Estado	10,0	—	—	P.	
42	Villaverde	Lag. Villaverde	Estado	7,0	—	—	P.	
43	Víllora	Cabriel	H. <sup>a</sup> Española	6,0	44.000	80,0	E.	



### Cuenca del Segura

N.º	Pantano	Río	Propietario	Capacidad millones m. <sup>3</sup>	Potencia Kw	Energía anual 10 <sup>6</sup> Kwh	Ejecución	Fecha prevista terminación
1	Fuentsanta	Segura	Estado	232,0	9.800	22,0	E.	1952
2	Cenajo	Segura	Estado	800,0	20.400	74,0	C.	
3	Talave	Mundo	Estado	52,0	1.900	8,0	E.	
4	Camarillas	Mundo	Estado	36,6	1.800	7,0	C.	1952
5	Argós	Argós	Estado	6,8	—	—	P.	
6	Quípar	Quípar	Estado	34,0	—	—	E.	
7	R. del Moro	R. del Moro	Estado	2,7	—	—	P.	
8	Corcovado	Mula	Estado	6,6	—	—	E.	
9	Valdeinferno	Luchena	Estado	20,0	—	—	E.	
10	Puentes	Guadalentín	Estado	22,0	85	0,5	E.	

### Cuenca del Sur

N.º	Pantano	Río	Propietario	Capacidad millones m. <sup>3</sup>	Potencia Kw	Energía anual 10 <sup>6</sup> Kwh	Ejecución	Fecha prevista terminación
1	Chorro	Guadalhorce	H. <sup>a</sup> Chorro	88,0	3.800	8,0	E.	
2	Agujero	Guadalmedina	Estado	5,0	—	—	E.	
3	Gaitanejo	Guadalhorce	H. <sup>a</sup> Chorro	0,5	2.700	6,0	E.	
4	Alhama	Andarax	Estado	—	—	—	P.	
5	Bayabona	Almanzora	Estado	30,0	7.450	26,0	P.	

### Cuenca del Guadalquivir

N.º	Pantano	Río	Propietario	Capacidad millones m. <sup>3</sup>	Potencia Kw	Energía anual 10 <sup>6</sup> Kwh	Ejecución	Fecha prevista terminación
1	Tranco de Beas	Guadalquivir	Estado	500,0	37.600	75,0	E.	1952
2	Portillo	Castril	Estado	17,0	—	—	P.	
3	Guadalentín	Guadalentín	Estado	40,0	—	—	P.	
4	Negratín	Guadiana Menor	Estado	400,0	6.000	20,0	P.	1950
5	Guadalmena	Guadalmena	Estado	340,0	4.000	15,0	P.	
6	Descuervavacas	Guadalén	Estado	116,0	8.500	37,5	P.	
7	Guadalén	Guadalén	Estado	173,0	—	—	C.	
8	Guarrizas	Guarrizas	Estado	100,0	4.000	15,0	P.	
9	Rumblar	Rumblar	Estado	126,0	2.000	8,0	E.	1950
10	Montoro (1)	Montoro	E. N. C. S.	29,0	—	—	C.	
11	Jándula	Jándula	Mengemor	342,0	15.000	30,0	E.	
12	Jándula	Encinarejo	Mengemor	15,0	8.300	16,0	E.	1952
13	Yeguas	Yeguas	Estado	15,00	2.000	8,0	P.	
14	Guadalmellato	Guadalmellato	Estado	109,0	3.000	11,5	E.	
15	Puente Nuevo	Guadiato	Estado	128,0	16.000	60,0	P.	
16	La Breña	Guadiato	Estado	115,0	—	—	E.	
17	Bembazar	Bembazar	Estado	312,0	11.000	42,0	P.	1952
18	Quéntar	Aguas Blancas	Estado	12,0	—	—	P.	
19	Dehesas Viejas	Cubillas	Estado	24,0	900	3,5	P.	
20	Cubillas	Cubillas	Estado	92,0	230	1,0	C.	
21	Colomera	Colomera	Estado	—	Sin definir	—	P.	

(1) Abastecimiento.



N.º	Pantano	Río	Propietario	Capacidad millones m. <sup>3</sup>	Potencia Kw	Energía anual 10 <sup>6</sup> Kwh	Ejecución	Fecha prevista terminación
22	Bermejales	Cacín	Estado	100,0	2.750	9,0	C.	1952
23	Iznájar	Genil	Estado	800,0	15.000	50,0	P.	
24	Cordobillas	Genil	H. <sup>a</sup> Chorro	71,0	15.000	50,0	P.	
25	Retortillo	Retortillo	Estado	50,0	—	—	P.	
26	Guadalbarcar	Guadalbarcar	Estado	33,0	—	—	P.	
27	Pintado	Viar	Estado	202,0	23.000	82,0	C.	1950
28	Pavones	Viar	Estado	—	—	—	P.	
29	Cala	Ribera de Cala	C. <sup>a</sup> Sevillana	60,0	18.000	30,0	E.	
30	Aracena	Ribera Huelva	Estado	106,0	3.500	11,5	P.	
31	Minilla (1)	Ribera Huelva	Ayuntamiento Sevilla	61,0	—	—	E.	
32	Del Cuervo	Guadamar	Estado	20,0	Sin definir	—	P.	
33	Torre del Águila	Salado	Estado	44,0	—	—	E.	
34	Bornos	Guadalete	Estado	215,0	Sin definir	—	P.	
35	Hurones	Majaceite	Estado	81,0	Sin definir	—	C.	1953
36	Guadalcaín	Majaceite	Estado	76,5	Sin definir	—	E.	

(1) Abastecimiento.

### Cuenca del Guadiana

N.º	Pantano	Río	Propietario	Capacidad millones m. <sup>3</sup>	Potencia Kw	Energía anual 10 <sup>6</sup> Kwh.	Ejecución	Fecha prevista terminación
1	Peñarroya	Guadiana Alto	Estado	44,0	—	—	C.	1953
2	Puerto	Azuer	Estado	16,0	—	—	P.	
3	Gasset	Becea	Estado	22,2	—	—	E.	
4	Cijara	Guadiana	Estado	1.495,0	22.080	84,0	C.	1951
5	Puerto Peña	Guadiana	Estado	447,0	11.800	52,0	P.	
6	Zújar	Zújar	Estado	200,0	—	—	P.	
7	Cornalbo	Albarregas	Estado	10,0	—	—	L	
8	Proserpina	Arroyo las Pradillas	Estado	3,4	—	—	E.	

### Cuenca del Tajo

N.º	Pantano	Río	Propietario	Capacidad millones m. <sup>3</sup>	Potencia Kw.	Energía anual 10 <sup>6</sup> Kwh.	Ejecución	Fecha prevista terminación
1	Entrepeñas	Tajo	Estado	755,0	35.000	85,0	C.	1954
2	Chincha	Guadiela	H. <sup>a</sup> Guadiela	5,0	4.820	14,0	E.	
3	Buendía	Guadiela	Estado	1.518,0	52.500	65,0	C.	1954
4	Bolarque	Tajo	U. E. M.	30,0	18.000	60,0	E.	
5	Pálmaces	Cañamares	Estado	30,0	600	1,4	C.	1950
6	El Vado	Jarama	Estado	56,0	4.000	13,0	C.	1950
7	Bonaval	Jarama	Estado	58,0	4.000	13,0	P.	
8	Riosequillo (1)	Lozoya	Canal Isabel II	49,0	—	—	C.	1951
9	Puentes Viejas (1)	Lozoya	Canal Isabel II	—	—	—	E.	
10	Villar (1)	Lozoya	Canal Isabel II	74,0	—	—	E.	
11	Pontón de Oliva (1)	Lozoya	Canal Isabel II	—	—	—	E.	
12	Santillana (1)	Manzanares	H. Santillana	46,0	9.100	20,0	E.	
13	Torcón (1)	Torcón	Estado	4,4	—	—	E.	
14	Burguillo	Alberche	S. Alberche	208,0	30.000	64,0	E.	
15	Charco del Cura	Alberche	S. Alberche	3,0	16.200	48,0	E.	
16	Tiemblo	Ga. Yedra	Estado	1,2	—	—	C.	1952
17	San Juan	Alberche	S. Alberche	148,0	40.000	65,0	C.	1954
18	Picadas	Alberche	S. Alberche	14,5	20.000	55,0	C.	1952
19	Rosarito	Tiétar	Estado	67,0	1.350	7,0	C.	1951
20	Jaranda	Jaranda	Estado	20,0	440	2,3	P.	
21	Garguera	G. <sup>a</sup> Garguera	Ramón Olleros	2,0	—	—	E.	
22	Armiñán	Ambroz	Con. Rg. Aldea Nueva	0,5	—	—	E.	
23	Gabriel y Galán	Alagón	Estado	234,0	6.000	22,0	C.	1953
24	Borbollón	Arrago	Estado	76,0	610	2,0	C.	1950

(1) Abastecimiento.



## Cuenca del Duero

N.º	Pantano	Río	Propietario	Capacidad millones m. <sup>3</sup>	Potencia Kw	Energía anual 10 <sup>6</sup> Kwh	Ejecución	Fecha prevista terminación
1	Cuerda del Pozo	Duero	Estado	161,0	7.500	12,0	E.	1 50
2	Vilde	Vilde	Con. Rg. La Favorita	0,2	—	—	E.	
3	Linares del Arroyo	Riaza	Estado	58,0	1.350	4,5	C.	
4	Burgomillado	Duración	E. Segoviana	8,0	1.650	5,0	E.	
5	Arlanzón	Arlanzón	Estado	20,0	800	4,0	E.	
6	Retuerta	Arlanza	Estado	117,0	3.500	18,0	P.	
7	Requejada	Pisuerga	Estado	65,0	4.800	14,0	E.	
8	Cervera	Pisuerga	Estado	10,0	105	0,2	E.	
9	Aguilar de Campoo	Pisuerga	Estado	261,0	5.300	27,0	P.	
10	Camporredondo	Carrión	Estado	70,0	7.400	29,0	E.	
11	Compuerto	Carrión	Estado	90,0	10.800	49,0	E.	1953
12	Porma	Porma	Estado	201,0	35.500	183,0	P.	
13	Barrios de Luna	Luna	Estado	308,0	34.800	80,0	C.	
14	Villameca	Tuerto	Estado	20,0	400	0,9	E.	
15	Ricobayo	Esla	Iberduero	1.100,0	118.400	550,0	E.	
16	Villalcampo	Duero	Iberduero	55,0	96.000	400,0	E.	
17	Castro	Duero	Iberduero	8,8	67.200	320,0	C.	
18	Santa Teresa	Tormes	Estado	397,0	20.000	86,5	C.	
19	Agueda	Agueda	Estado	15,3	900	5,0	E.	

### ANEJO NÚM. 7

En este Anejo se trata de ampliar el concepto indicado en el texto original, señalando que no hay asociaciones vegetales, naturales o artificiales, que puedan rendir acción beneficiosa de carácter hidrológico tan considerable como la que proporciona el bosque, y, en segundo lugar, abogar por una intervención estatal decidida para la creación, conservación indefinida y aprovechamiento ordenado de esos montes protectores.

Ningún cultivo o asociación herbácea o arbustiva ofrece como el vuelo arbóreo sobre las apretadas filas de sus fustes, más tupida red de copas y ramaje que aminora sensiblemente la violenta precipitación del agua; nieve o granizo de temporal, y, luego, la deja caer sin violencia sobre otra segunda protección del suelo o capa de mantillo integrada por despojos foliáceos y leñosos en período más o menos avanzado de una transformación fertilizante, constituida por los restos del vuelo, muy abundantes, acumulados durante su existencia permanente; a través de esta segunda defensa, el agua recibida de las precipitaciones atmosféricas se pone suavemente en contacto con el suelo, y tampoco ninguna asociación vegetal puede ofrecer este suelo más profundamente atravesado por el fuerte y voluminoso sistema radical de la masa arbórea, y con-

secuentemente con mayor capacidad para absorber y retener el agua.

De esta manera, la que no ha sido absorbida por el suelo del bosque para ser devuelta cristalina y tranquila a través de manantiales a las vaguadas, escurre lentamente por la rugosa superficie detenida en su marcha por la multiplicidad de obstáculos de los elementos no descompuestos del mantillo, raíces someras y tocones o bases de los árboles.

Esta esquemática exposición del proceso regulador que produce el bosque para transformar las impetuosas precipitaciones atmosféricas en fuente inagotable de riqueza y energía, explica también su influencia antierosiva, fenómeno éste de la erosión que se presenta especialmente agravado en los suelos desnudos y pendientes, descompuestos o fácilmente disgregables, tan frecuentes en la alta montaña, y que, en cuanto reciben precipitaciones de cierta intensidad, pierden su cohesión y se transportan, convertidos en lava que todo lo destruye y arrolla, hacia las tierras de las que se sustenta el hombre, u obras de las que se aprovecha para su progreso.

El técnico proyectista de un embalse regulador, al estudiar todas las características de su cuenca de recepción, no puede soslayar el problema de los acarrees, porque si éstos son de tal cuantía que lleguen a col-



mar su vaso, o a aminorarlo en su capacidad reguladora en forma muy apreciable, o se prescinde de la obra, o su construcción exige la corrección y repoblación de la parte de la cuenca que proporciona esos arrastres.

La corrección de que incidentalmente se acaba de hablar no consiste, como es sabido, más que en la colocación de abundantes y, en general, sencillos diques transversales para reducir la pendiente del torrente por tramos escalonados casi horizontales, y suele ser la primera fase hasta que el monte o bosque ya creado proporciona la estabilidad definitiva que nunca puede conseguirse con los trabajos de corrección propiamente dichos.

La consecuencia funesta de estos arrastres de material sólido arrancados de la montaña al valle por lluvias más o menos abundantes es siempre patente en todo torrente, pero llega a ser de extraordinaria importancia cuando ese carácter puede atribuirse a extensas cuencas, produciéndose así inundaciones devastadoras como las que han sufrido durante el año 1948, y repetidas veces en años anteriores, la ciudad de Murcia y sus feraces huertas, y para cuya supresión en el porvenir ha iniciado el Gobierno el estudio y trabajos para la corrección y repoblación forestal de los afluentes del río Segura, más temibles en aquel sentido.

Como contrapartida grata de estos lamentables sucesos o penosas prevenciones, citaremos el caso del río Guadalmedina, como ejemplo típico del feliz resultado logrado por la coordinación de los trabajos hidráulicos y forestales que han dominado este río torrencial, que, repetidas veces, durante varios siglos, ha causado multitud de víctimas en la ciudad de Málaga y poblados de su cuenca, repetidas inundaciones en esa bella ciudad andaluza, con pérdidas cuantiosísimas.

Este proceso tan claro y definitivo puede comprobarse constantemente, aunque en menor escala, en todos los trabajos de corrección de torrentes unidos a su repoblación forestal emprendidos por la Administración forestal del Estado.

*Intervención estatal en los trabajos de corrección y repoblación forestal de las cuencas de cabecera, o de recepción de los pantanos reguladores para la producción de energía hidroeléctrica.*

Tales trabajos pueden suponer desembolsos muy importantes, gravando así con un porcentaje elevado el

capital de empresa; además, han de requerir el empleo de abundantes plantas y semillas, y un personal especializado, al margen de las disponibilidades habituales de las Sociedades eléctricas.

Cuando del estudio de una cuenca que afecta a la construcción de un pantano de esta naturaleza se desprende la necesidad de la ejecución de aquellas obras complementarias de la corrección y repoblación forestal, siquiera sea parcial, pero de delicada ejecución y que implica la inversión considerable de numerario, puede optar la Sociedad correspondiente por pechar con su realización, optar por la desestimación del proyecto, o finalmente, no tener en cuenta la importancia del posible entarquinamiento del embalse, con los perjuicios extraordinarios que esta posición cómoda puede acarrear en plazo más o menos largo a los mismos asociados, a la industria y riqueza creada a su amparo, y, en fin de cuentas, a la Nación.

La primera solución tiene el gran inconveniente de su elevado coste.

La segunda solución no merece tal nombre, porque nada resuelve esa obra inacometida que supone la pérdida de una fuente de riqueza de que no anda tan sobrada nuestra Nación.

La tercera es poco probable que ocurra hoy día, pues las empresas nunca darán lugar a ello.

Y, como al Estado le interesa sobremanera que el capital privado acuda en la proporción necesaria a la ejecución inaplazable del plan nacional de aprovechamiento de nuestra potencialidad hidroeléctrica, de ahí la conveniencia, por no decir imperiosa necesidad, de que acuda en su auxilio, efectuando directamente o con la colaboración prevista en las disposiciones vigentes, las correcciones y repoblaciones precisas para el máximo rendimiento de nuestros cursos de agua, y la perpetuidad de sus obras de carácter hidráulico en pleno rendimiento.

Esta acción estatal es, además, ineludible en las cabeceras de los días de mayor importancia, que carecen de la regulación de los grandes pantanos.

Entendiéndolo así, el Ministerio de Agricultura, a través de sus Servicios competentes, ha formulado durante el último decenio proyectos de corrección que, con sus repoblaciones inseparables, suponen más de 300 millones de pesetas, si bien, las cantidades invertidas durante el mismo lapso no rebasaron los 70 mi-



llones de pesetas, incluyendo en éstos los de repoblación de una 7.000 Has.; inversiones que afectaban, no solamente a los proyectos indicados, sino a otros aprobados con anterioridad y en curso de ejecución.

Asimismo, ha repoblado durante el mismo decenio 275.000 hectáreas, con finalidad fundamental de dotar a nuestro país una extensión de bosques cuya productibilidad llegue a bastar las exigencias nacionales, hoy muy superiores a la renta de nuestros montes; y es de advertir que muchas de estas repoblaciones han de hacer sentir ya su influjo hidrológico beneficioso en plazo reducido.

Finalmente, conviene añadir que no basta con crear un bosque, sino que hace falta saberlo conservar y explotar, condiciones que para los que tienen el carácter protector señalado, es fundamental se cumplan de manera permanente para que también su acción persista mientras tenga que defender las obras construídas a su amparo, o que motivaron su nacimiento.

El Ministerio de Agricultura, por medio de sus dos Direcciones Generales, de Montes y del Patrimonio Forestal del Estado, y sin necesidad de la promulgación de nuevas disposiciones, dispone de amplios recursos para actuar en esa clase de terrenos que deban sustentar los montes protectores, bien sea con la expropiación forzosa subsiguiente a la declaración de esos trabajos de utilidad pública, o bien mediante las leyes especiales por que se rige el Patrimonio Forestal del Estado—Ley de 10 de marzo de 1941 y Reglamento de 30 de mayo del mismo año—, previa declaración de «Comarca de Interés Forestal», que prevé un ahorro considerable de gastos al prescindir de la expropiación o adquisición de terrenos, que pueden ofrecerse en consorcio a este Organismo para su repoblación forestal, y también concede como solución a los propietarios de los predios afectados su repoblación voluntaria, bajo la dirección y tutela permanente estatal.

En resumen, en este aspecto podrían sentarse las siguientes conclusiones:

1.ª Para la regularidad y máximo aprovechamiento hidroeléctrico de la red hidrográfica española, es deseable la intervención estatal repoblando forestalmente las cabeceras de los principales ríos, o terrenos de fuertes pendientes, y la ejecución de las correcciones de torrentes necesarias.

2.ª Esa intervención estatal es de desear llegue igualmente a las cuencas de recepción de los grandes embalses reguladores, cualquiera que sea su destino, y, por consiguiente, para los de producción de energía hidroeléctrica.

3.ª Tales trabajos pueden facilitarse con la declaración de zonas de interés forestal previstas en la Ley de 10 de marzo de 1941 y Reglamento de 30 de mayo del mismo año para su aplicación.

### ANEJO NÚM. 3

#### CLASIFICACIÓN DE LAS CENTRALES HIDRAULICAS ESPAÑOLAS, POR SUS POTENCIAS

Para este trabajo se ha partido de los datos de las centrales hidráulicas que figuran en los Censos por provincias, que publican los Servicios de Estadística Industrial de la Dirección General de Industria. Estos Censos contienen datos muy completos de las centrales instaladas en las distintas provincias españolas. Por no estar todavía publicados los correspondientes a las de Alicante, Madrid y Oviedo, hemos tomado, para las mismas, los datos de la última estadística anual del Sindicato de Agua, Gas y Electricidad.

Para fijar las potencias de las centrales, hemos admitido, con carácter general, un  $\cos \varphi = 0,8$ , ya que, en las estadísticas citadas, aparecen aquellas potencias en Kw. Hemos añadido y clasificado en la misma forma las nuevas centrales instaladas después de las fechas de publicación de los Censos respectivos y que, por tanto, no figuraban en los mismos.

Como conclusión de nuestro trabajo se llega a las siguientes cifras:



	Centrales que figuran en las estadísticas citadas		Nuevas centrales que no aparecen en dichas estadísticas	
	Número	Kw	Número	Kw
Centrales mayores de 50.000 Kw ... ..	3 (0,1 %)	300.800 (19,9 %)	1 (3,3 %)	96.000 (31,1 %)
Centrales entre 10.000 y 50.000 Kw ... ..	32 (1,4 %)	658.013 (43,4 %)	6 (20 %)	132.000 (42,7 %)
Centrales entre 1.000 y 10.000 Kw ... ..	132 (5,7 %)	358.226 (23,6 %)	23 (76,7 %)	80.784 (26,2 %)
Centrales entre 500 y 1.000 Kw ... ..	91 (4,0 %)	63.864 (4,2 %)	—	—
Centrales menores de 500 Kw ... ..	2.050 (88,8 %)	135.378 (8,9 %)	—	—
	2.308 (100 %)	1.516.281 (100 %)	30 (100 %)	308.784 (100 %)

TOTAL ACTUAL: 2.338 centrales con 1.825.065 kW.

El examen de estas cifras demuestra que más del 88 por 100 de las centrales hidráulicas actualmente instaladas, son de potencia menor de 500 Kw, en tanto que la potencia de estas pequeñas centrales no representa más que el 8,9 por 100 del total instalado en centrales hidráulicas.

#### ANEJO NÚM. 9

Según las estadísticas oficiales, las producciones e importaciones de carbones en España en el período 1935-1948 (con excepción de los años de la Guerra de Liberación), han sido las que figuran en el cuadro siguiente:

Año	HULLA Tm.		ANTRACITA Tm.		LIGNITO Tm.	TOTAL Tm.
	Nacional	Importación	Nacional	Importación		
1935	6.331.939	1.566.610	696.298	57.490	311.734	8.964.071
1940	7.765.763	280.523	1.095.804		569.404	9.711.494
1941	7.603.056	239.946	1.168.331		827.150	9.838.483
1942	8.028.929	206.314	1.277.697		1.140.847	10.653.787
1943	8.412.850	194.960	1.258.769		1.161.983	11.028.562
1944	8.899.596	118.289	1.547.784		1.208.714	11.774.383
1945	9.032.987	91.381	1.601.881		1.341.800	12.068.049
1946	9.184.403	94.413	1.500.229		1.335.868	12.114.913
1947	9.061.937	201.734	1.426.780		1.275.294	11.965.745
1948	8.964.313	971.055	1.459.176		1.398.402	12.792.946

En el año 1948, según las estadísticas oficiales de la Comisión para la Distribución del Carbón, los principales consumidores nacionales de carbón, clasifica-

dos en orden de importancia, son los que figuran en el siguiente cuadro:



CONSUMIDOR	H U L L A		ANTRACITA Tm.	LIGNITO Tm.	TOTAL Tm.
	Nacional Tm.	Importación Tm.			
Ferrocarriles ... ..	2.082.292	75.734	21.579	20.618	2.200.223
Siderurgia y coquerías ... ..	1.784.727	51.693	4.013		1.840.433
Usos domésticos ... ..	172.724		1.027.101	171.649	1.371.474
CENTRALES ELECTRICAS ... ..	847.166	185.528	44.595	109.989	1.187.278
Fábricas de aglomerados ... ..	811.537		104.900	9.890	926.327
Cementos ... ..	497.974	3.882	106.290	106.730	714.876
Marina mercante ... ..	451.721	103.992			555.713
Industria minera ... ..	328.234	3.599	35.763	82.234	449.830
Textil ... ..	43.035		12.073	370.831	425.939
Flota pesquera ... ..	221.848	125.607			347.455
Cerámica, cales y yesos ... ..	147.473		75.253	122.059	344.785
Azucarera ... ..	208.387	47.223	35.105	48.008	338.723
Fábricas de gas ... ..	303.422	2.488	3.571	10.529	320.010
Química ... ..	164.181		36.219	89.881	290.281
Metallurgia y fundición ... ..	171.547	5.488	29.988	10.517	217.540
Papelera ... ..	28.562		111.368	77.330	217.260
Vidriera ... ..	66.972		17.416	18.790	103.178
Marina de Guerra ... ..	62.901				62.901
Obras Públicas ... ..	49.663		2.032	1.420	53.115
Varias industrias y variación almacenes ... ..	230.599	92.262	297.546	63.323	88.638
CONSUMO TOTAL REGISTRADO ... ..	8.674.965	697.496	1.369.720	1.313.798	12.055.979

Del examen de este cuadro se deduce que las centrales térmicas ocupan el cuarto lugar dentro de nuestra economía, en cuanto a consumo de carbón, con un 10 por 100, aproximadamente, del total.

En el año 1949, del que aún no tenemos datos completos, el consumo de carbón para centrales térmicas ha sido superior al de 1948.

Es de señalar que por resultar insuficientes las disponibilidades de carbón para atender a todas las necesidades de la industria nacional, se procede al reparto del combustible mediante cupos cuyo porcentaje representa una parte más o menos reducida de las necesidades, según la importancia de la industria a que se refiera.

#### ANEJO NÚM. 10

Las cantidades de carbón extranjero importadas en los últimos dos años 1948-1949, con destino a la producción de energía eléctrica de las centrales térmicas españolas, según datos de la Comisión para la Distribución del Carbón, han sido las siguientes:

M E S	AÑO 1948	AÑO 1949	
	Inglaterra Tm.	Inglaterra Tm.	Francia Tm.
Enero ... ..	0	33.419	0
Febrero ... ..	0	29.046	0
Marzo ... ..	0	21.849	9.744
Abril ... ..	0	31.554	6.475
Mayo ... ..	0	11.476	4.930
Junio ... ..	15.121	21.410	7.297
Julio ... ..	14.412	40.499	11.589
Agosto ... ..	17.687	48.797	0
Septiembre ... ..	33.615	30.003	0
Octubre ... ..	36.843	47.950	0
Noviembre ... ..	32.487	31.930	0
Diciembre ... ..	35.363	20.323	0
TOTAL ... ..	185.528	368.253	40.035

Estas importaciones se han realizado forzosamente, como consecuencia de la crisis de energía originada por la falta de producción hidráulica, consecuencia de la sequía. Las divisas que, aproximadamente, han representado las anteriores importaciones de carbón desti-



nado exclusivamente a las centrales térmicas, han sido las siguientes:

— Año 1948.....	925.000 libras esterlinas.
— Año 1949.....	$\left\{ \begin{array}{l} 1.840.000 \text{ libras esterlinas.} \\ 320.000.000 \text{ francos franceses.} \end{array} \right.$

La importancia de estas cifras en relación con la escasez de divisas de nuestra economía para otras importaciones fundamentales, demuestra claramente el sacrificio que para nuestra Nación han representado las mencionadas importaciones y la necesidad de restringirlas todo lo posible.

#### ANEJO NÚM. 11

### ESTUDIOS SOBRE UTILIZACIONES

En la conferencia «LA UTILIZACIÓN DE LAS CENTRALES ELÉCTRICAS», pronunciada el 27 de febrero de 1945 en la Asociación Electrotécnica Española, en Barcelona, por D. Pedro J. Lucía, se empieza por definir el concepto de horas anuales de utilización, como cociente de los Kwh. producidos por una central en un año, y la potencia instalada, en Kw, en la misma. Para un conjunto de centrales se tomará el cociente de la producción total en el año a la potencia total instalada.

Expresando las horas de utilización  $h$  en función del factor de carga  $f$  (relación de la demanda media a la máxima), y del factor de reserva  $r$  (relación de la demanda máxima a la potencia instalada), resulta:

$$h = \frac{8.760 f}{r}$$

fórmula que puede extenderse a un conjunto de centrales empleando factores de carga y de reserva «estadísticos» del conjunto, definido el primero como relación de la demanda media y la suma de demandas máximas, y el segundo como la de esta suma a la potencia total instalada.

El Sr. Lucía analiza más adelante la influencia del consumo en las horas de utilización. El número de éstas queda limitado por el factor de carga de la de-

manda. En el caso de sumarse varios consumos con un cierto factor de diversidad, se demuestra que la utilización del conjunto mejora siempre. Si se pueden sumar consumos suplementarios o de relleno, la utilización mejoraría considerablemente.

En cuanto a la influencia de las fuentes de energía sobre la utilización, se hace ver que en ellas conviene conjugar las de agua fluyente con otras de acumulación o térmicas, y que una utilización total  $(8.760/r)$ , supuesta una carga ideal constante, sólo puede conseguirse en centrales térmicas.

El conferenciante analiza luego la influencia del factor de potencia en la utilización de las centrales, haciendo resaltar el efecto pernicioso de un bajo valor del mismo y el gran interés que tiene el mejorarlo.

A continuación se ocupa en el estudio estadístico de las horas de utilización, partiendo de los valores «estadísticos» de los factores de carga y de reserva, y determina la utilización de un conjunto de centrales hidráulicas y térmicas en función de las horas de utilización y de las potencias instaladas de unas y otras centrales.

Finalmente, estudia la utilización de las centrales eléctricas españolas. A continuación, se transcribe su exposición, por ser esta parte la de mayor interés para el presente Anejo:

«Tomo el año 1935, por considerarlo como el último normal y representativo, por lo que hace a la utilización de nuestras centrales. De 1936 a 1939 se abrió el trágico paréntesis de nuestra guerra civil. En el año 1939 y parte del 1940 se hacían reconstrucciones de centrales, subestaciones y redes. Y desde mediados de 1940, el consumo empezó a echarse encima de la producción, por insuficiencia de la potencia instalada. Como he mostrado en otra reciente conferencia, el resultado ha sido que el factor de reserva,  $r$ , ha bajado casi a la unidad; por otra parte, el consumo se ha tenido que ir acomodando, «volens nolens», a las posibilidades de producción, en vez de ser ésta —como es lo normal— la que se sujete y obedezca a la demanda. Así se ha producido una idea falsa de una gran utilización de las centrales, puro espejismo que se disipará en cuanto la potencia instalada guarde relación con las necesidades del consumo, y a éste se le deje en libertad de movimientos que siempre ha tenido y debe tener.



### Producción hidráulica:

De las estadísticas publicadas, se deduce:

$$\begin{aligned}h_{ht} &= 2.693 \text{ horas.} \\K_{hi} &= 1.170.000 \text{ Kw.} \\r_{ht} &= 1,177. \\f_{ht} &= 0,362.\end{aligned}$$

### Producción térmica:

$$\begin{aligned}h_{tt} &= 756 \text{ horas.} \\K_{ti} &= 389.000 \text{ Kw.} \\r_{tt} &= 1,585. \\f_{tt} &= 0,137.\end{aligned}$$

### Producción total:

$$\begin{aligned}h_t &= 2.210 \text{ horas.} \\K_i &= 1.559.000 \text{ Kw.} \\r_t &= 1,256. \\f_t &= 0,317. \\ \Sigma K_{hi} / \Sigma K_{ti} &= 3,01.\end{aligned}$$

Comentarios: a) en 1935 era bastante bajo el valor de  $h_{ht}$ , y sumamente reducido el de  $h_{tt}$ ; b) como consecuencia, resultaba escasa la utilización del conjunto (sólo 2.210 horas); c) el factor de reserva  $r_{ht}$  era aceptable, aunque inferior al que existe en otros países; el  $r_{tt}$  era más bien exagerado, aunque esto sólo en apariencia, pues, mucha de la potencia térmica que figuraba como instalada en las estadísticas, o no estaba en condiciones de funcionamiento o, por lo menos, no era capaz de dar su potencia nominal; d) los factores de carga  $f_{ht}$ ,  $f_{tt}$  y  $f$  eran bajos (0,317 el estadístico del conjunto).

### *Cifras óptimas que cabe esperar en el futuro.*

#### Producción hidráulica:

Cuando se restablezcan la normalidad y el equilibrio entre la producción y el consumo, actuando éste libremente, quizá se pueda alcanzar (adoptando las medidas que luego diremos), pero difícilmente superar, un factor de carga en las centrales hidráulicas,

$$f_{ht} = 0,50 \quad (0,362 \text{ en } 1935).$$

Por otro lado, un servicio eléctrico bien atendido aconseja que la relación  $r_h^t = \Sigma K_{hi} / \Sigma K_{hm}$ , o factor

de reserva, no sea inferior a 1,20. Tomaremos, pues, esta cifra:

$$R_{ht} = 1,2 \quad (1,177 \text{ en } 1935).$$

Con estos valores, las horas de utilización de la potencia hidráulica instalada serían:

$$h_{ht} = 8.760 \times 0,50 / 1,20 = 3.650 \quad (2.693 \text{ en } 1935).$$

#### Producción térmica:

Aunque es de suponer que las centrales térmicas van a desempeñar en el futuro un papel más importante que en el pasado, éste no dejará de ser secundario. Parece poco probable que su factor de carga «estadístico» supere a la mitad del de las centrales hidráulicas. De acuerdo con esta hipótesis, tomaremos:

$$f_{tt} = 0,25 \quad (0,137 \text{ en } 1935).$$

En cuanto a la relación  $r_{tt}$  —siempre superior a la  $r_{ht}$ —, es natural que disminuya algo; supondremos

$$r_{tt} = 1,5 \quad (1,585 \text{ en } 1935).$$

Substituyendo estos valores en la fórmula de  $h_{tt}$ , se encuentra:

$$h_{tt} = 8.760 \times 0,25 / 1,5 = 1.460 \quad (756 \text{ en } 1935).$$

#### Producción total:

Dentro de la estimación que venimos haciendo, admitiremos que la relación de la potencia hidráulica a la térmica mantendrá, sobre poco más o menos, su valor de 1935, que era prácticamente igual a 3. Es decir, suponemos que de toda la potencia instalada, el 75 por 100 seguirá siendo hidráulico, y el 25 por 100, térmico.

Aplicando ahora la fórmula de las horas de utilización del total, resulta:

$$h_t = 3.650 - \frac{3.650 - 1.460}{3 + 1} = 3.100 \text{ horas} \quad (2.210 \text{ en } 1935).$$

Tendría que cambiar esencialmente la naturaleza de nuestro consumo eléctrico (existiendo, por ejemplo, enormes consumos electroquímicos, casi constantes), para que las horas anuales de utilización del conjunto de los Kw instalados excediesen sensiblemente de esta cifra de 3.100.»

Termina el Sr. Lucía exponiendo las medidas que, a su juicio, deben tomarse para llegar a la cifra de



3.100 horas de utilización que ha calculado; las cuales, en resumen, son las siguientes:

a) Diversificar las clases de demandas y poner en paralelo el mayor número posible de cargas.

b) Interconectar las centrales y hasta los sistemas. Procurar que la carga total absorba, ante todo, la potencia hidráulica de las centrales sin acumulación. Tratar de reducir la diversidad de los picos de potencia de las centrales y que aquéllos sean próximos, en el tiempo, a la máxima demanda.

Ello equivale a: Una nueva estructura económica, con otras tarifas, fomentando grandes consumos, reduciendo el precio medio de venta del Kwh y aumentando el costo del Kw instalado; pero facturando mucho más.

Una nueva estructura técnica, con redes reforzadas, interconexiones y solución a todos los problemas que éstas llevan consigo.

«UTILIZACIONES DE LAS CENTRALES TÉRMICAS EN ESPAÑA», del artículo «Inventario de las posibilidades eléctricas nacionales», publicado por don José Luis Redonet Maura, Ingeniero Industrial, Director de UNESA.—Estudio incluido en el trabajo presentado en las II Jornadas de Ingeniería Industrial, en mayo de 1949 bajo el título «La industria eléctrica en la industrialización de España» y, posteriormente, recogido en la *Revista de Ciencia Aplicada*, en el número noviembre-diciembre del mismo año.

Empieza su estudio el Sr. Redonet comparando las utilidades del año 1935, que es el último año de explotación normal antes de la Guerra de Liberación, y, posteriormente, las utilidades de las centrales en el año 1942, último año de suministro eléctrico sin restricciones; año 1945, de la máxima sequía, con excepción del año 1949, hasta la fecha, y 1947, último año del que poseía información completa en los momentos en que redactó el artículo.

En cada uno de los cuatro años citados especifica las utilidades de la potencia hidráulica y térmica del conjunto, determinando, además, la proporción de la potencia hidráulica respecto a la total, que en el último año resulta ser el 78,5 %.

A continuación, el Sr. Redonet estudia la contextura de la demanda del mercado en dos días laborables

típicos: uno, del mes de junio, y otro, del mes de diciembre. Inserta un gráfico y deduce las áreas correspondientes a cada una de las dos curvas de la potencia horaria en los días laborables citados, y saca la conclusión de que, en diciembre, la utilización de la potencia máxima es del 76,8 %, y, en junio, del 65,5 %. Por haber sido obtenidos los datos en las subestaciones de transformación y, asimismo, a base de valores medios horarios, admite que la potencia instantánea efectiva debe de ser de un 20 %, superior a los indicados en los gráficos, y que, por tanto, las utilidades máximas reales son las siguientes:

En diciembre ... ..	64,0 %
En junio ... ..	54,6 %

y el promedio de la utilización máxima anual lo estima en un 59,3 %.

Después de estudiar los días laborables, festivos, etcétera, y llevar el porcentaje de utilización a las horas del año, llega a la conclusión de que la utilización máxima con la actual estructura del mercado, es de 4.380 horas.

Sigue diciendo el Sr. Redonet que la cifra anterior ha sido obtenida atendiendo exclusivamente a las características de la demanda y admitiendo que no hubiera limitación alguna en cuanto a la posibilidad de producción. Como esto no es posible, por las variaciones estacionales de los ríos y su poca regulación actual, estima que, para el conjunto de las centrales hidráulicas españolas, no es admisible una utilización media superior en la actualidad a las 3.100 horas. Para las térmicas de bocamina admite como máxima normal 4.000 y 1.000 horas de utilización, según quemen carbones pobres o ricos, y para aquellas térmicas situadas en centros de consumo, 500 horas anuales de utilización.

A continuación, el autor indica las utilidades en otros países, y termina el artículo admitiendo la posibilidad de alcanzar dentro de 15 ó 20 años las 4.000 horas de utilización de la potencia hidroeléctrica en España, condicionándola a la terminación de los embalses en construcción y, al mismo tiempo, a la consecución de una mejor curva de demanda del mercado, apoyando la producción hidroeléctrica en centrales térmicas a bocamina.



# DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA PARA DISTINTOS CONSUMOS EN DIFERENTES PAÍSES

Incluimos en el estado y gráfico de este Anejo los datos que hemos podido obtener de la distribución y consumos de la energía eléctrica en sus diversas apli-

caciones para diferentes países. Las cifras que se indican corresponden a los últimos años para los que hemos podido obtener dichos datos.

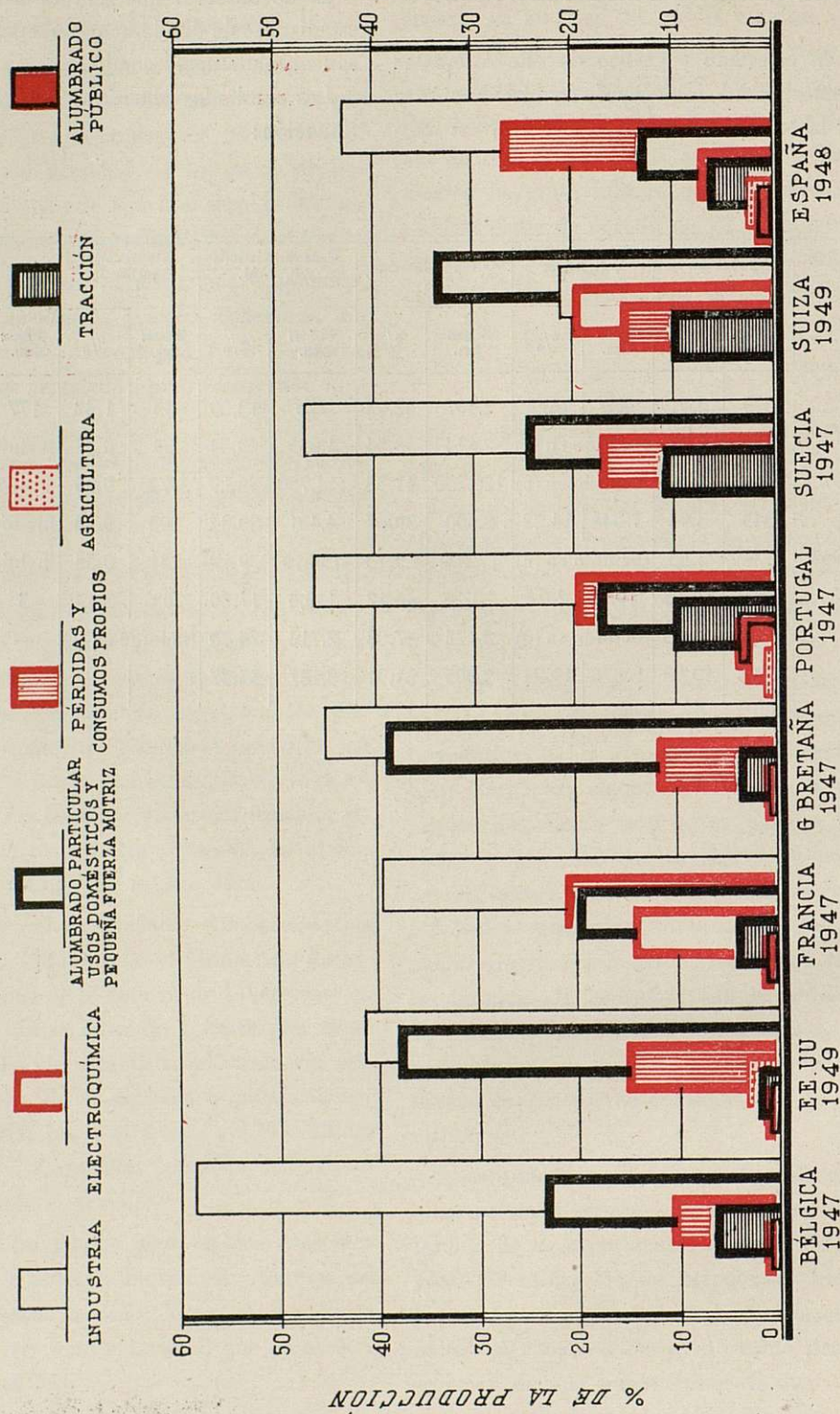
Es de observar que, por falta de unificación en las estadísticas de donde hemos tomado la información, no son absolutamente comparables los datos señalados.

Los resultados obtenidos son los que figuran a continuación:

PAÍS	Tracción (a)		Electroquímicas y análogas (b)		Otras industrias (c)		Usos domésticos y P. F. M. (d)		Alumbrado público (e)		Agricultura (f)		Pérdidas y con- sumos propios	
	Millones Kwh.	o/o	Millones Kwh.	o/o	Millones Kwh.	o/o	Millones Kwh.	o/o	Millones Kwh.	o/o	Millones Kwh.	o/o	Millones Kwh.	o/o
España (1948)....	379	6,51	408	6,99	2.507	42,92	776	13,29	83	1,43	177	2,02	1.567	26,84
Bélgica (1947)....	301	6,72	Incluido en (c)		2.624	58,54	1.055	23,54	39	0,87	Incluido en (d)		463	10,33
EE. UU. (1949)...	6.100	2,09	Incluido en (c)		120.750	41,38	111.750	38,29	2.725	0,93	7.425	2,55	43.083	14,76
Francia (1947)....	843	3,93	3.048	14,22	8.500	39,67	4.461	20,82	205	0,96	Incluido en (d)		4.371	20,40
G. Bretaña (1947).	1.369	3,45	Incluido en (c)		17.909	45,13	15.510	39,09	231	0,58	Incluido en (d)		4.664	11,75
Portugal (1947)...	65,9	10,05	19,3	2,94	302,4	46,12	115,4	17,60	20,6	3,14	3	0,46	129,1	19,69
Suecia (1947).....	1.223	11,13	Incluido en (c)		5.173	47,08	2.714	24,70	Incluido en (c)		—	—	1.877	17,09
Suiza (1949).....	949	10,08	1.876	19,94	2.005	21,31	3.187	33,87	—	—	—	—	1.39	14,80



# DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA PARA DISTINTOS CONSUMOS EN DIFERENTES PAISES





## Nuevas Centrales y ampliaciones puestas en servicio en el período 1940-1949

NOMRE	HIDRAULICAS		TERMICAS	Año de puesta en servicio	OBSERVACIONES
	Río	Potencia en Kw	Potencia en Kw		
Doiras	Navia	14.400		1941	Tercer grupo, ampliación.
Mañeru	Salado	4.800		1944	
Castillonroy	N. Ribagorzana	1.600		1944	
Millares	Júcar	20.000		1945	Cuarto grupo, ampliación.
Vadillos	Guadiela	1.360		1945	
Los Villanuevas	Mijares	1.440		1945	
La Retorna	Najerilla	1.120		1945	Ampliación.
Rozadío	Nansa	4.800		1945	
La Riera	Saliencia	2.600		1945	
La Requiñada	Piedra	1.440		1945	Primer grupo, ampliación.
Baños	Caldarés	2.120		1945	
El Corchado	Guadiaro	5.200		1945	
La Riera	Saliencia	5.200		1946	Segundo y tercer grupo, ampliación.
El Corchado	Guadiaro	3.760		1946	
Contreras	Cabriel	800		1946	
Paredones	Guadalhorce	3.120		1946	
Pasteral II	Ter	880		1946	
Llauset	Llauset	1.360		1946	
Villora	Cabriel	14.000		1946	Cuarto grupo, ampliación.
Embid	Jalón	3.600		1946	
Pueyo I	Caldarés	3.360		1946	
La Vega	Guadalquivir	1.920		1946	Ampliación.
San Adrián			5.000	1946	
Cartagena			5.000	1946	
La Felguera			5.000	1946	Móvil del INI.
Zaragoza			5.000	1946	
Sevilla			5.000	1946	
Puertollano			1.000	1946	Móvil del INI.
Galindo			3.000	1946	
Crevillente			3.000	1946	
Ferrol			2.500	1947	Móvil del INI.
Viella	Garona	20.000		1947	
Chulilla	Turia	1.280		1947	
Zumarresta	Urumea	2.720		1947	Ampliación.
Betolegui	Irati	2.400		1947	
Peña de Bejo	Nansa	15.200		1947	
Leboreiro	Mao	1.920		1947	
Almoguera	Tajo	7.040		1947	
Zorita	Tajo	3.520		1947	
Irabia	Irati	1.280		1947	Primer grupo.
Esla	Esla	29.600		1947	
Marracos	Gállego	3.520		1947	
Cereceda	Ebro	7.600		1947	Cuarto grupo, ampliación.
Gobantes	Turón	3.350		1947	
Flix	Ebro	40.000		1948	
Ribesalbes	Mijares	7.040		1948	Ampliación.
Villafranca	Guadalquivir	4.400		1948	
Cereceda	Ebro	7.600		1948	
Argoné	Espera	7.200		1948	Segundo grupo, ampliación.
Ujo			12.800	1948	
Las Conchas	Limia	11.600		1948	
Burceña			16.000	1948	Ampliación.
Artesiaga	Artesiaga	1.200		1948	
Zorita	Tajo	3.520		1948	
Tambre	Tambre	8.480		1948	Segundo grupo, ampliación.
Salinas	Cinca	2.400		1948	
Bielsa	Barrosa	1.600		1948	
Las Conchas	Limia	11.600		1949	Segundo grupo, ampliación.
Villalcampo	Duero	96.000		1949	
Guadaira			17.500	1949	
P. G. <sup>a</sup> Rodríguez			32.000	1949	
Compostilla			50.000	1949	
Barasona	Espera	22.400		1949	
Lada			25.000	1949	Primer grupo.
Herrerías	Nansa	4.000		1949	
TOTALES		427.350	188.240		



# Nuevas Centrales y ampliaciones en construcción en 1.º de enero de 1950

CENTRAL	HIDRÁULICAS		TÉRMICAS Potencia en Kw	Probable puesta en servicio	OBSERVACIONES
	Río	Potencia en Kw			
Contreras	Cabriel	2.400		1950	Dos grupos de 1.200. Ampliación.
Gestálgar	Turia	1.920		1950	
Los Tilos	Guadiela	720		1950	Primer grupo.
Zalla	Ordunte	1.000		1950	
F. del Azufre	Sil	5.600		1950	
Aliaga			10.000	1950	Primer grupo.
Dílar	Dílar	1.360		1950	Ampliación.
San Ramón	Genil	480		1950	Ampliación.
Senet	N. Ribagorzana	8.640		1950	
Almadenes	Segura	6.400		1950	Ampliación.
Aoiz	Irati	1.360		1950	Ampliación.
Herrerías	Nansa	4.000		1950	Segundo grupo.
Sequeiros	Sil	6.000		1950	Primer grupo.
Florida	Narcea	3.300		1950	
Aliaga			10.000	1950	Segundo grupo.
Sallent	Aguaslimpias	5.680		1950	Primer grupo.
Pintado	Viar	6.400		1950	Primer grupo.
Jauja	Genil	5.400		1950	
Puertollano			30.000	1950	Primero, segundo y tercer grupo.
Vilaller	N. Ribagorzana	4.320		1951	
Picadas	Alberche	20.000		1951	
El Irati	Irati	1.040		1951	Ampliación.
Priañes	Nalón y Nora	4.180		1951	Primer grupo.
Sequeiros	Sil	6.000		1951	Segundo grupo.
Villanúa	Aragón	3.200		1951	Primer grupo.
Sallent	Aguaslimpias y Gállego	5.680		1951	Segundo grupo.
Escatrón			50.000	1951	Dos grupos de 25.000 Kw.
Benós	Garona	14.400		1951	
Oliana	Segre	28.000		1951	
Bono	N. Ribagorzana	3.920		1951	
Llesp	N. Ribagorzana	12.400		1951	
Cofrentes	Júcar	36.000		1951	Primer grupo.
Bolarque	Tajo	28.000		1951	
Colmenar	Mijares	5.600		1951	
Bosque	Júcar	4.800		1951	
Los Tilos	Guadiela	800		1951	Segundo grupo.
Pontenovo	Navea	19.200		1951	Un grupo de 6.400 y otro de 12.800
Moncabril	Tera y Lagunas	23.000		1951	
Lada			25.000	1951	Segundo grupo.
Cázulas	Cázulas	1.800		1951	Primer grupo.
Artías	Garona	60.500		1952	
Cofrentes	Júcar	72.000		1952	Segundo y tercer grupos.
El Picazo	Júcar	16.000		1952	
Los Cantos	Mijares	4.800		1952	
Onda (p. de p.)	Mijares	400		1952	
Celis	Nansa	5.600		1952	
Priañes	Nalón y Nora	4.180		1952	Segundo grupo.
Dobra	Dobra	6.000		1952	Primer grupo.
La Sarra	Aguaslimpias	18.000		1952	
Tranco de Beas	Guadalquivir	37.600		1952	
Doña Aldonza	Guadalquivir	10.400		1952	Dos grupos.
P. Marín	Guadalquivir	5.200		1952	Primer grupo.
Poqueira I	Poqueira	11.200		1952	
Ronda	Guadalevín	2.400		1952	
Sallent-Escana	Aguaslimpias	5.680		1952	Tercer grupo.
Argoné	Essera	7.200		1952	
Pintado	Viar	10.000		1952	
San Juan	Alberche	40.000		1953	
Cantillana	Guadalquivir	6.400		1953	
Castro	Duero	67.200		1953	
Los Peares	Miño	48.000		1953	Primer grupo.
Salime	Navia	25.000		1953	Primer grupo.
Montefurado	Sil	38.400		1953	Dos grupos.
Suma y sigue .....		785.160	125.000		



CENTRAL	HIDRÁULICAS		TÉRMICAS	Probable puesta en servicio	OBSERVACIONES
	Río	Potencia en Kw	Potencia en Kw		
	<i>Suma anterior.....</i>	785.060	125.000		
Sequeiros	Sil	6.000		1953	Tercer grupo.
Dobra	Dobra	6.000		1953	Segundo grupo.
Aliaga			20.000	1953	Segunda etapa.
Arañones	Ibón de Ip	11.000		1953	
Moncabril	Tera y Lagunas	11.500		1953	Tercer grupo.
Pont de Suert	N. Ribagorzana	14.900		1953	
Poqueira II	Poqueira	25.600		1953	
Entrepeñas	Tajo	40.000		1954	
Buendía	Tajo	60.000		1954	
Salime	Navia	50.000		1954	Segundo y tercer grupos.
Doiras	Navia	14.400		1954	Cuarto grupo.
Pontenovo	Navea	19.200		1954	Segunda etapa.
Montefurado	Sil	12.800		1954	Tercer grupo.
Los Peares	Miño	96.000		1954	Segundo y tercer grupos.
Cordovilla	Genil	12.950		1954	
San Juan	Genil	9.000		1954	
P. Marín	Guadalquivir	5.200		1954	Segundo grupo.
Poqueira III	Poqueira	25.600		1954	
Ter medio	Ter	28.000		1954	Dos centrales 13 + 15.000 Kw.
Caldas	Tor	21.400		1954	
Bohi	Tor	14.300		1954	
Salime	Navia	25.000		1954	Cuarto grupo.
Barazas	Zadorra	134.000		1954	
San Esteban	Sil	240.000		1955	
Escatrón			50.000	1955	Tercer grupo.
Puertollano			20.000	1955	Cuarto y quinto grupos.
	TOTALES ... ..	1.668.010	215.000		

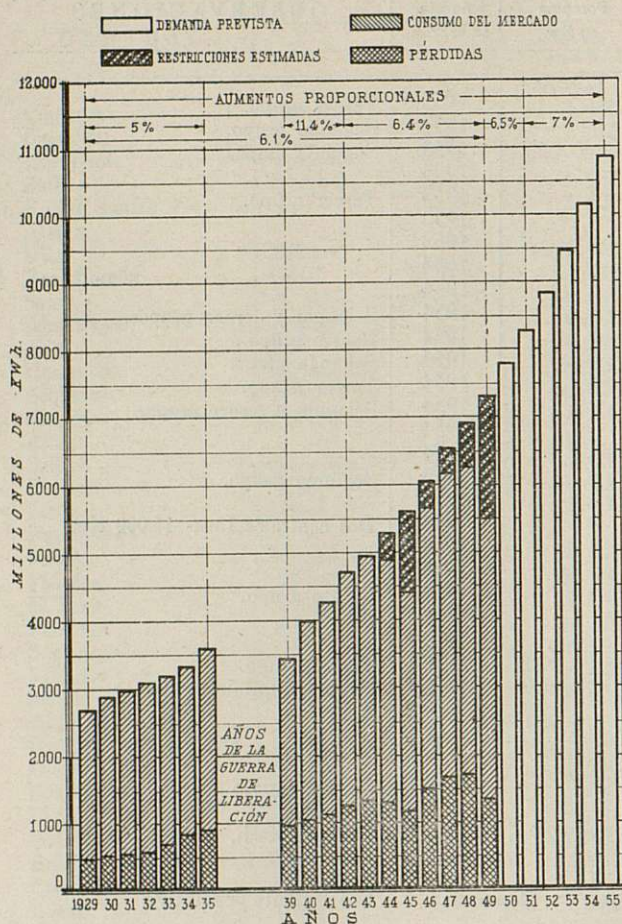
#### ANEJO NÚM. 14

Demanda real del mercado en el período 1929 a 1955. - Millones de Kwh.

Año	Pérdidas	Consumo	Restricciones	Demanda	Crecimiento vegetativo
1929	480	2.188	0	2.668	5,0 %
1930	529	2.333	0	2.862	
1931	548	2.401	0	2.949	
1932	583	2.490	0	3.073	
1933	697	2.478	0	3.175	
1934	825	2.491	0	3.316	
1935	889	2.693	0	3.582	11,4 %
1939	967	2.436	0	3.403	
1940	1.020	2.937	0	3.957	
1941	1.120	3.132	0	4.252	
1942	1.245	3.454	0	4.699	
1943	1.312	3.627	0	4.939	6,4 %
1944	1.294	3.586	390	5.270	
1945	1.152	3.232	1.200	5.584	
1946	1.490	4.152	370	6.012	
1947	1.659	4.509	350	6.518	
1948	1.690	4.586	600	6.876	
1949	1.317	4.171	1.792	7.280	
1950				7.753	6,5 %
1951				8.257	
1952				8.835	7 %
1953				9.453	
1954				10.115	
1955				10.823	



## DEMANDA REAL DE ENERGÍA EN EL PERIODO 1929-1955



ANEJO NÚM. 16

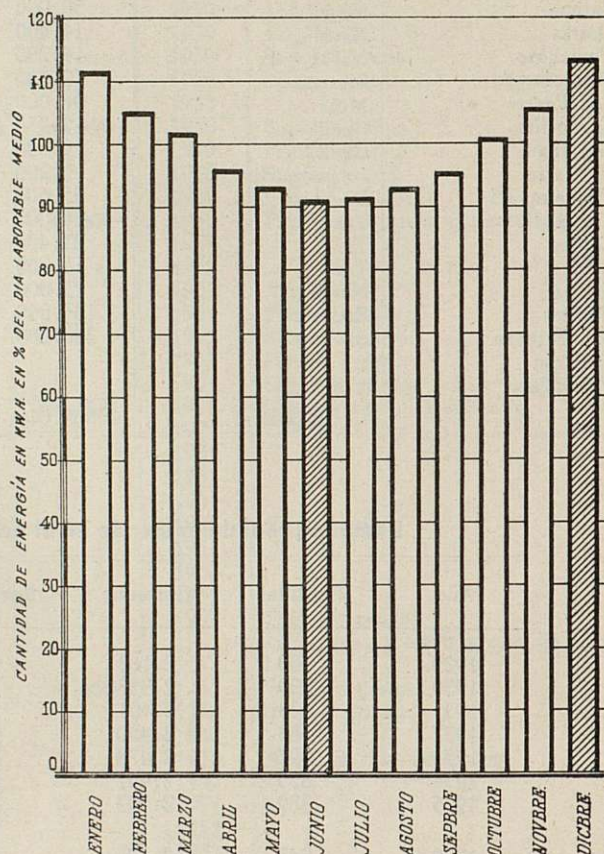
## DEMANDA DE ENERGÍA EN DÍA LABORABLE DE CADA UNO DE LOS MESES DEL AÑO

En el gráfico que figura a continuación hemos representado el consumo de energía en un día laborable típico, en la segunda quincena de cada uno de los meses del año, ya que el señalar el consumo de la totalidad de cada mes, como suele hacerse, es muy poco significativo, pues depende dicho consumo de las fiestas y domingos que tenga el mes, así como del diferente número de días de cada uno de los meses del año.

En el gráfico referido señalamos los porcentajes que representa el consumo en estos días típicos, tomando como cien el valor medio de la media de los días considerados. Se observa que el día típico de máximo consumo, que representa, aproximadamente, el 113,7 %

de la media, corresponde al mes de diciembre. Efectivamente, no sólo en España, sino en casi todos los países, es el segundo o tercer miércoles de este mes el que registra la máxima carga. El mínimo de consumo corresponde al típico del mes de junio, que representa, aproximadamente, el 90 % de la media.

## DEMANDA DE ENERGÍA PREVISTA EN ESPAÑA EN DÍA LABORABLE DE CADA UNO DE LOS MESES DEL AÑO



ANEJO NÚM. 16

## CONSUMO ESTIMADO DEL MERCADO NACIONAL EN LA PRIMERA SEMANA DEL AÑO 1950

Del 1 al 7 de enero de 1950 el mercado nacional, como consecuencia de las lluvias recogidas en el mes de diciembre, estuvo prácticamente sin restricciones, ya que únicamente en la zona Sur se aplicaron unas leves restricciones y una ligera ordenación del consumo.

Como consecuencia de esta situación, los abonados



industriales, que habían estado padeciendo fuertes restricciones los meses anteriores, se lanzaron a recuperar en lo posible el trabajo perdido por culpa de aquellas, y fueron muchos los que superaron la jornada normal para aprovechar la coyuntura favorable que suponía la disponibilidad de energía.

En estas condiciones, la producción máxima diaria en dicha semana correspondió al miércoles 4 de enero, y alcanzó para las sociedades agrupadas en UNESA y para las centrales térmicas de empresas filiales del INI, la cifra de

18,5 millones de Kwh.

Para considerar en el cálculo las ligeras restricciones que todavía existían en la Zona Andaluza, aun cuando éstas seguramente estarían compensadas con el exceso de consumo sobre lo normal de las restantes Zonas, admitimos un millón de Kwh de restricción, lo que nos da como consumo máximo del mencionado miércoles

19,5 millones de Kwh.

Como la producción total de las empresas que integran la UNESA es el 82,5 % de la total de España, resultará esta producción total en el mencionado día de máximo consumo de la semana que consideramos

23,6 millones de Kwh.

Aplicando el porcentaje que representa el mes de enero en el conjunto del año, deducido del gráfico del Anejo núm. 15, resulta como consumo medio en día laborable del año

21 millones de Kwh.

Es de observar que este consumo corresponde al miércoles, día de máxima carga. Es inferior en los restantes días laborables de la semana, en especial los lunes y sábados, pero, sin embargo, considerando dicho consumo como la media normal, y multiplicándolo por los 330 días laborables que tiene el año, teniendo en cuenta que los domingos y días festivos equivalen, aproximadamente, a medio día laborable, resultaría que la demanda del mercado nacional sin restricciones en el conjunto del año hubiera sido de

$330 \times 21 \text{ millones} = 6.930 \text{ millones de Kwh.}$

Para tener en cuenta las restricciones *invisibles*, es

decir, aquellas que no se advierten de manera directa por ser consecuencia de suministros no contratados por causa de restricciones, añadimos a la cifra anterior 350 millones de Kwh anuales, lo que nos da un total de

7.280 millones de Kwh.

para la producción necesaria para que en el año 1949 no hubiese existido ninguna restricción.

Los datos que hemos tomado corresponden ya a la primera semana del mes de enero de 1950, y, por tanto, al considerar el valor deducido como correspondiente al año 1949, tomamos otro nuevo margen de seguridad en nuestros cálculos, ya que nos apoyamos más bien en datos de 1950 que en datos de 1949.

#### ANEJO NÚM 17

#### RITMO REQUERIDO EN LA PUESTA EN SERVICIO DE NUEVAS POTENCIAS ANUALES PARA ATENDER LA DEMANDA DE ENERGÍA DEL MERCADO, SEÑALADA EN EL ANEJO NÚM. 14.

Para este cálculo, que figura en el cuadro adjunto, admitimos 3.100 horas de utilización como normal en el período 1951-1959, y, a partir de 1960, se van incrementando las horas de utilización hasta llegar a 4.000 horas, en 1970. Este incremento de utilizaciones está justificado y puede ser posible por la entrada en servicio de nuevos pantanos reguladores de nuestros sistemas hidráulicos y la probabilidad de que podamos llenar las reservas hiperanuales de que disponga nuestro país, al mismo tiempo que una mayor diversidad de consumo mejore la actual curva de carga. El valor de los importantes incrementos de potencia, necesarios en cada año, demuestra el acelerado ritmo que han de llevar las nuevas construcciones y la importancia de los capitales que habrá que emplear en los próximos lustros.

Empezamos este cuadro en el año 1951, ya que las centrales que entrarán antes en servicio están ya en construcción avanzada y con una considerable parte de los capitales precisos ya desembolsados.



Año	Demanda en millones de Kwh.	Horas de utilización	Potencia en miles de Kw.	Incremento anual de potencia Kw.
1951	8.257	3.100	2.663,5	—
1952	8.835	3.100	2.850,0	186.500
1953	9.453	3.100	3.049,3	199.300
1954	10.115	3.100	3.262,9	213.600
1955	10.823	3.100	3.491,2	228.300
1956	11.580	3.100	3.735,4	244.200
1957	12.390	3.100	3.996,7	261.300
1958	13.257	3.100	4.276,4	279.700
1959	14.185	3.100	4.575,8	299.400
1960	15.178	3.200	4.743,1	167.300
1961	16.240	3.300	4.921,2	178.100
1962	17.377	3.300	5.265,7	344.500
1963	18.593	3.400	5.468,5	202.800
1964	19.895	3.400	5.851,4	382.900
1965	21.288	3.500	6.082,3	230.900
1966	22.778	3.600	6.327,2	244.900
1967	24.372	3.700	6.587,0	259.800
1968	26.078	3.800	6.862,6	275.600
1969	27.903	3.900	7.154,6	292.000
1970	29.856	4.000	7.464,0	309.400

ANEJO NÚM 18

Producción anual de energía eléctrica y principales materias primas  
en el período 1940 - 1948

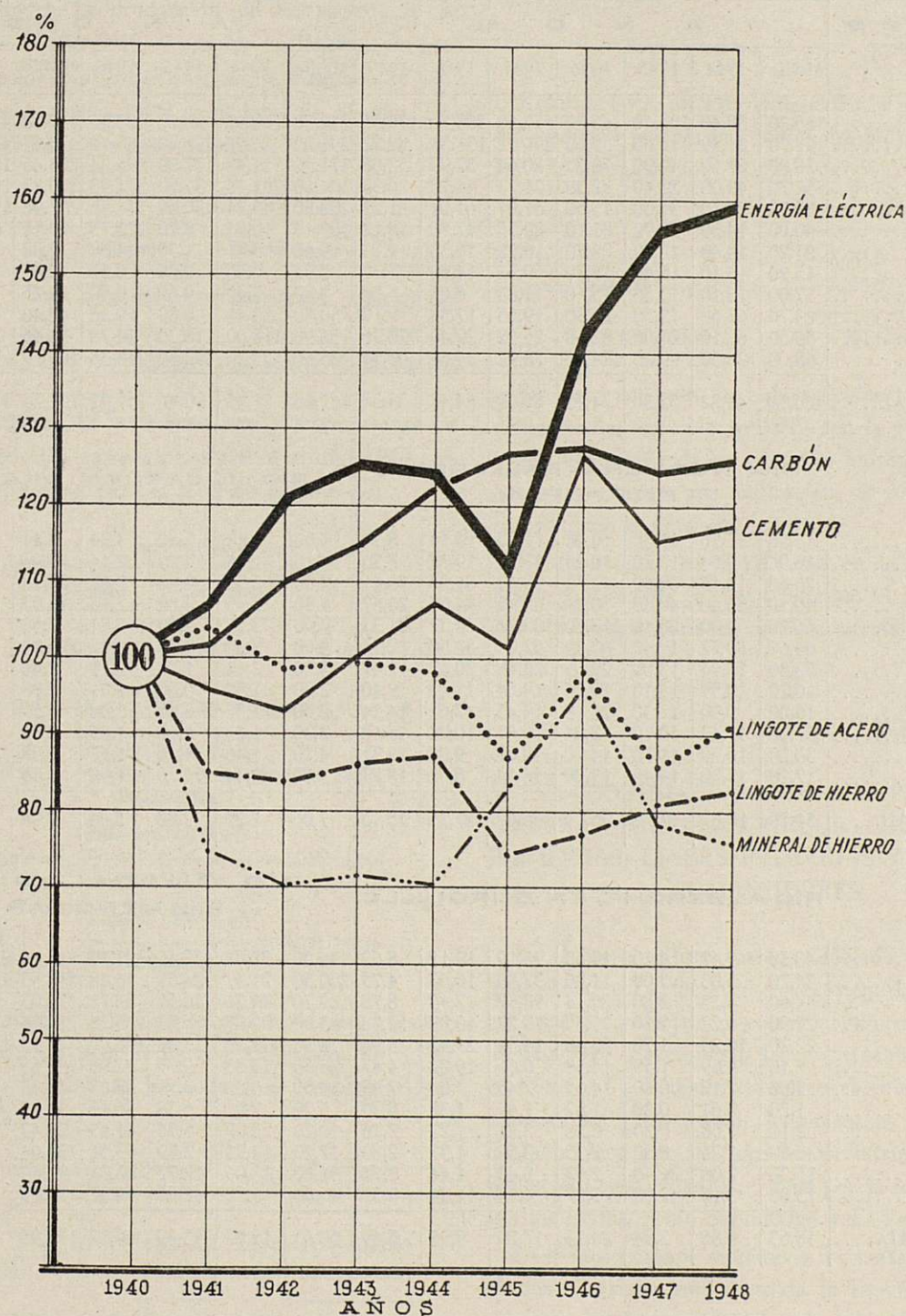
Año	ELECTRICIDAD		CARBÓN		CEMENTO	
	Miles de Kwh	Índice 1940	Toneladas	Índice 1940	Toneladas	Índice 1940
1940	3.957	100	9.430.971	100	1.407.373	100
1941	4.251	108	9.598.537	102	1.328.034	95
1942	4.699	119	10.447.473	111	1.306.959	93
1943	4.939	125	10.833.602	115	1.444.684	103
1944	4.880	124	11.656.094	124	1.521.324	109
1945	4.384	111	11.976.668	127	1.445.892	103
1946	5.641	143	12.020.500	128	1.815.305	128
1947	6.168	156	11.764.011	125	1.650.499	117
1948	6.276	159	11.821.891	126	1.674.087	119

Año	MINERAL DE HIERRO		LINGOTE DE HIERRO		LINGOTE DE ACERO	
	Toneladas	Índice 1940	Toneladas	Índice 1940	Toneladas	Índice 1940
1940	2.236.102	100	625.918	100	654.896	100
1941	1.720.338	74	536.865	85	681.304	104
1942	1.670.370	70	528.117	84	637.350	99
1943	1.587.817	71	542.735	86	656.286	100
1944	1.585.671	71	549.726	87	640.711	99
1945	1.901.950	89	470.694	75	560.018	87
1946	2.190.000	98	490.000	77	630.000	99
1947	1.776.189	79	509.962	81	541.754	83
1948	1.716.684	77	519.226	83	596.842	91



# ÍNDICES DE PRODUCCIÓN ANUAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS EN EL PERIODO 1940 ~ 1948





**Caudales medios mensuales de los principales ríos de interés hidroeléctrico, en año medio  
y en el período 1944 - 1949**

m³ / s.

MESES	RÍO NAVIA, EN DOIRAS							RÍO ESLA, EN BRETO						
	AÑOS							AÑOS						
	Medio	1944	1945	1946	1947	1948	1949	Medio	1944	1945	1946	1947	1948	1949
Enero . . . . .	155,20	50,40	204,50	65,20	117,50	308,70	116,55	258,50	104,97	96,00	125,46	119,60	475,93	124,64
Febrero . . . . .	177,70	31,40	115,60	59,60	290,32	131,31	32,22	291,50	81,74	228,30	86,10	476,17	423,40	54,89
Marzo . . . . .	78,00	61,50	40,30	70,30	180,64	37,99	52,08	371,50	111,48	177,00	194,34	775,45	194,45	102,55
Abril . . . . .	57,70	48,00	28,40	82,30	126,73	48,70	26,39	304,10	261,76	131,00	371,93	370,23	105,76	66,43
Mayo . . . . .	80,70	25,10	35,00	115,50	61,07	61,07	21,23	202,80	45,71	30,50	516,86	267,96	170,74	36,00
Junio . . . . .	40,00	14,50	23,90	82,10	29,35	47,70	18,12	109,10	10,91	8,20	222,73	81,11	60,33	11,50
Julio . . . . .	25,20	14,40	12,30	22,70	15,23	18,33	9,23	19,60	5,41	1,70	14,08	2,88	2,43	2,19
Agosto . . . . .	15,20	16,10	15,40	15,70	9,53	14,60	5,37	2,90	0,50	0,80	0,53	0,41	0,90	1,00
Septiembre . . . . .	17,00	18,10	13,50	15,60	11,83	8,65	6,86	7,80	7,40	0,50	0,50	24,25	0,50	1,70
Octubre . . . . .	23,70	67,60	13,50	25,30	19,55	12,56	9,10	50,80	58,43	0,80	19,26	42,40	0,69	12,27
Noviembre . . . . .	59,50	67,10	26,00	82,10	25,32	29,40	70,96	156,90	118,00	118,30	84,78	38,46	22,20	34,40
Diciembre . . . . .	68,00	128,50	99,20	224,60	78,92	54,64	92,56	235,40	171,20	292,50	258,38	102,19	94,32	112,60
MEDIA ANUAL . . . . .	66,50	45,22	52,30	71,75	80,49	64,47	38,38	167,60	81,45	90,46	157,91	191,76	129,30	46,68

RÍO NOGUERA - PALLARESA, EN POBLA								RÍO JÚCAR, EN VILLALBA							
Enero . . . . .	15,80	11,76	11,50	10,48	11,90	16,54	8,34	15,00	1,88	2,50	3,94	2,44	23,81	1,62	
Febrero . . . . .	16,90	9,64	13,70	10,05	17,56	19,78	7,26	16,10	1,43	4,20	2,44	29,93	13,75	1,18	
Marzo . . . . .	26,60	14,15	20,60	13,78	55,42	31,93	10,41	12,00	2,55	3,10	7,61	33,18	7,57	1,10	
Abril . . . . .	40,20	33,00	40,80	70,72	63,49	44,66	20,57	9,30	3,95	2,80	12,13	16,03	5,40	0,88	
Mayo . . . . .	66,20	54,00	28,40	117,50	109,28	78,37	21,33	9,90	3,15	2,00	19,84	7,58	8,08	1,24	
Junio . . . . .	64,60	29,77	19,60	89,39	52,04	52,50	22,14	5,00	3,34	1,70	6,87	3,82	6,08	1,33	
Julio . . . . .	33,30	11,96	13,00	29,65	26,88	20,67	12,41	3,20	2,18	1,70	3,11	2,46	3,07	0,92	
Agosto . . . . .	16,20	10,59	15,10	19,26	14,54	15,43	9,40	2,20	1,39	0,90	2,01	2,88	1,79	0,88	
Septiembre . . . . .	18,00	9,90	13,30	21,19	14,45	17,61	14,24	2,00	1,57	0,80	2,08	1,59	1,56	3,11	
Octubre . . . . .	32,90	11,47	10,70	13,94	19,61	10,04	15,18	2,20	1,25	1,00	1,85	2,21	1,52	1,90	
Noviembre . . . . .	33,20	16,90	11,70	14,70	19,60	9,85	22,31	4,10	1,46	1,20	1,52	1,58	1,40	4,06	
Diciembre . . . . .	17,20	13,30	14,40	13,29	16,14	8,52	18,27	3,30	3,44	11,70	1,99	4,86	1,43	2,36	
MEDIA ANUAL . . . . .	31,70	18,87	17,72	36,16	35,07	27,15	15,15	7,00	2,29	2,80	5,44	9,04	6,29	1,71	

RÍO ALBERCHE, EN BURGUILLO								RÍO GUADALQUIVIR, EN MENGÍBAR							
Enero . . . . .	43,50	9,47	4,20	19,63	3,19	19,11	8,62	134,00	35,82	28,19	21,10	118,66	239,06	28,22	
Febrero . . . . .	36,20	5,03	5,00	11,86	37,80	16,63	4,75	200,50	21,47	26,51	16,48	588,53	113,00	30,50	
Marzo . . . . .	44,60	4,25	2,80	20,14	98,87	12,45	8,78	89,20	44,76	16,51	82,78	376,03	62,16	23,56	
Abril . . . . .	27,90	26,22	3,20	71,35	29,27	10,88	12,38	83,50	29,27	6,83	183,26	216,36	45,76	14,74	
Mayo . . . . .	22,20	10,25	1,70	90,46	14,51	29,97	6,98	72,50	12,78	3,01	146,00	77,13	104,77	21,80	
Junio . . . . .	7,10	4,69	1,50	14,58	6,66	10,22	4,47	25,50	13,53	9,76	32,96	31,63	29,87	11,49	
Julio . . . . .	3,00	2,12	0,60	4,11	2,45	3,04	2,45	11,50	5,22	6,99	33,63	33,08	19,19	10,87	
Agosto . . . . .	1,20	0,61	0,20	1,87	1,49	1,37	0,70	5,70	7,41	6,38	36,15	38,25	27,80	12,10	
Septiembre . . . . .	2,10	1,08	0,20	2,22	2,21	1,22	2,76	10,20	23,09	1,56	41,57	34,43	29,01	32,54	
Octubre . . . . .	5,60	1,25	0,50	2,35	3,52	1,37	2,80	17,20	14,71	2,89	13,51	34,64	43,43	22,16	
Noviembre . . . . .	15,20	2,06	26,40	2,12	3,43	1,44	2,72	31,80	13,05	12,77	60,38	31,45	33,83	25,26	
Diciembre . . . . .	15,00	3,16	49,00	3,27	4,14	11,84	8,51	46,00	13,78	42,90	54,32	39,79	24,58	18,55	
MEDIA ANUAL . . . . .	18,63	5,85	7,94	20,33	17,29	9,96	5,49	60,63	19,57	13,69	60,17	134,99	64,37	20,98	



# PRODUCCIÓN QUE HUBIERA SIDO POSIBLE EN AÑO HIDRAÚLICO NORMAL CON LA POTENCIA INSTALADA EN 1949

Partiendo de la producción de las sociedades de UNESA en el año 1949, y con los coeficientes de proporción de los años anteriores, se ha estimado la producción para el año 1949 en el total de España. Los valores obtenidos son los siguientes:

## PRODUCCION EN KWH.

	Térmica	Hidráulica	Total
UNESA ... ..	1.345.777.243	3.200.824.415	4.546.601.658
% ... ..	82,9	82,7	82,8
España... ..	1.622.000.000	3.866.000.000	5.488.000.000

Considerando las inauguraciones y ampliaciones de centrales puestas en servicio durante el año 1949, resulta una potencia para el total de España de:

## POTENCIA EN KW.

Térmica	Hidráulica	Total
602.947	1.890.150	2.493.097

Con esta potencia, resulta una utilización de

Térmica:	$\frac{1.622.000.000 \text{ Kwh}}{602.947 \text{ Kw}} = 2.690 \text{ horas.}$
Hidráulica:	$\frac{3.866.000.000 \text{ Kwh}}{1.890.150 \text{ Kw}} = 2.045 \text{ horas.}$
Total:	$\frac{5.488.000.000 \text{ Kwh}}{2.493.097 \text{ Kw}} = 2.201 \text{ horas.}$

Con la utilización realmente conseguida en las centrales térmicas y aceptando una utilización de 3.100 horas en las hidráulicas, la producción posible en 1949 hubiera sido:

	Potencia Kw.	Horas	Producción Kwh.
Térmica ... ..	602.947	2.690	1.622.000.000
Hidráulica ... ..	1.890.150	3.100	5.859.500.000
TOTAL ... ..	2.493.097	3.000	7.481.500.000

El desglose de la demanda para 1949 se ha estimado en las siguientes partidas:

	Kwh. x 10 <sup>6</sup>	%
Pérdidas ... ..	1.317	18,1
Consumo ... ..	4.171	57,3
Restricciones ... ..	1.792	24,6
TOTAL DEMANDA ... ..	7.280	100,0

Resulta, pues, un excedente entre la producción que hubiera sido posible en condiciones hidráulicas normales y la demanda de:

	Kwh. x 10 <sup>6</sup>
Producción posible ... ..	7.481,5
Demanda máxima estimada... ..	7.280,0
EXCEDENTE ... ..	201,5 millones de Kwh.

En resumen, pues, se hubiera cubierto en exceso la demanda del mercado en 1949 con la producción real y una utilización de las centrales hidráulicas de 3.100 horas, resultando una utilización de 3.000 horas del conjunto de la potencia instalada.

Ha de tenerse en cuenta que en la utilización de 3.100 considerada, está ya incluido el margen de reserva necesaria para un servicio normal.

# MAPA ESQUEMÁTICO CON LOS PRINCIPALES SISTEMAS HIDROELÉCTRICOS, CUENCAS CARBONÍFERAS, LÍNEAS PRIMARIAS Y MERCADOS CONSUMIDORES

En el mapa adjunto hemos señalado, en forma esquemática, para facilitar su examen, los principales sistemas hidroeléctricos, concentrándolos en su centro de gravedad aproximado, las principales cuencas carboníferas que disponen de aprovechamientos térmicos a bocamina y los principales mercados consumidores del país, bien por su importancia intrínseca de gran población, como Madrid, o bien por la importancia de sus industrias, como Sabiñánigo y El Ferrol.

En el mismo mapa señalamos las zonas en que, a los efectos eléctricos, está dividida la España peninsular, así como las líneas primarias de transporte, represen-



tadas con rojo, y las de interconexión, representadas con azul. Las líneas en puntos son las que aún están en estudio o proyecto, y los trazados que señalamos no pueden considerarse, por tanto, como definitivos en muchos casos.

Del examen de este mapa se deduce claramente que con las líneas actuales en explotación y en construcción, así como las que están en proyecto y estudio,

quedan perfectamente ligadas las cuencas carboníferas con los sistemas hidroeléctricos, y ambas con los principales centros consumidores de energía del país. Ello demuestra que el conjunto de nuestro sistema primario de líneas de transporte e interconexión se ha realizado de manera lógica, oportuna y racional.

1950.

---

---

*Terminada la exposición de esta Ponencia, el Sr. Presidente de la Sección manifiesta su criterio sobre la forma en que, para mayor brevedad y eficacia de los debates, deben llevarse las deliberaciones, y para ello nada mejor que comenzar por abrir debate sobre la totalidad de la Ponencia.*

*El Sr. Congresista que desee hacer uso de la palabra, dice, puede hacerlo.*

*Después de pausa prolongada dice: Por lo que parece, la Sección se adhiere en principio y en conjunto a los términos en que están redactadas las conclusiones de la Ponencia, así que abramos un debate particular sobre cada una de ellas.*

*Leída por el Sr. Lucia la 1.ª conclusión, se aprueba sin discusión.*

*Leída la 2.ª, el Sr. Lucia advierte que en el texto de la Ponencia y en sus Anexos se detalla un poco más lo que en la conclusión se indica, pero que no creía que la índole del trabajo de la Ponencia aconsejara poner ya, desde ahora, posibles soluciones de otras fuentes energéticas. Hemos reconocido, añade, que hay un problema; sobre él se trabajará y se está trabajando en otros países, y aun en el nuestro, sólo queríamos señalar que no es inagotable la fuente eléctrica y térmica de España, dado el crecimiento rápido del consumo. Este es el alcance de la conclusión.*

*Queda aprobada la conclusión, así como las leídas posteriormente, 3.ª y 4.ª*

*A continuación se leyó la conclusión 5.ª y las sub conclusiones a), b) y c) de la misma, que fueron aprobadas, y sobre la subconclusión d) leída a continuación, el Sr. Serret expone que, si fuera posible, convendría reforzarla y aun desglosarla en tres partes, cual expuso en otro trabajo presentado al Congreso y que no tuvo impugnación.*

*Añade el Sr. Serret: Tan importante es la producción de energía eléctrica a que van a dar lugar los hiperembalses contruídos por el Estado español y los que se van a construir, que puede cifrarse en el cincuenta por ciento de la energía que se produjo en España en 1943, año hidráulico medio. Esa energía no solamente se va a producir en los saltos de pie de presa de esos embalses, sino —y a ello le doy importancia— en los saltos aguas abajo de esos embalses y—esto es más importante aún— con la maquinaria que actualmente está instalada; ese cincuenta por ciento de que he hablado antes, se puede cifrar en orden de magnitud en 2.300 millones Kw-h año. Puede decirse que de unos 500 a 600 millones se producirán de manera regular con las máquinas actualmente instaladas en los saltos que hay aguas abajo de los embalses que se hallan en construcción por el Estado español. Si ello es así, parece que a nadie perjudica y a todo el mundo beneficia que se*











dé preferencia absoluta y total a la construcción de esos embalses, haciéndolo de manera práctica, o sea concediéndole supremacía en el suministro de primeras materias: cemento, hierro principalmente, además de elementos de transporte: gasolina, y de vida para el personal obrero allí enclavado. Eso sería, como si dijéramos, una super a. n. n. (super absoluta necesidad nacional), puesto que ha de beneficiar a todos los productores de energía y a todos los consumidores.

También proponía ayer en la segunda conclusión que se financiara de algún modo el capital necesario para hacer que estas construcciones se realizaran rápidamente.

Y, como secuela de estas dos proposiciones, existe una tercera: Para que se puedan aumentar considerablemente las horas de utilización de los diferentes embalses y utilidades hidroeléctricas de aguas fluentes, es completamente necesario que las Juntas de desembalse existentes en las diferentes cuencas, estén de alguna manera unidas, en una función de tipo nacional, que sea la que haga que estos desembalses se coordinen de manera conjunta, a fin de que, cuando el agua haya de ser desembalsada para el riego, no pase por el ladrón del aprovechamiento hidráulico, sino que haga rodar las turbinas y alternadores de energía.

Esta es la manera como veo que se podría desglosar la subconclusión d), haciéndola mucho más eficaz y mucho más concreta.

A petición del Sr. Lucía, el Sr. Serret da lectura a las tres conclusiones a que hace referencia, y que figuran en el trabajo núm. 236 de la Sección II, titulado: "Problemas que plantea la producción y distribución de la energía eléctrica".

Interviene en el debate D. Manuel Gutiérrez Cortines para señalar que, a su juicio, lo que propone el Sr. Serret representa un paso más, casi una articulación a la propuesta de conclusiones que formula la Ponencia.

La Ponencia, sobre poco más o menos, dice: "Impulsar en el grado posible el plan de construcción de embalses reguladores que tiene en proyecto, actualmente o en realización, el Ministerio de Obras Públicas." Me parece que se entiende perfectamente, dice el Sr. Gutiérrez Cortines, lo que la Ponencia recomienda, y estimo que ésta es la verdadera solución del problema.

El ir más allá y determinar en qué forma se debe llevar a cabo este impulso, es función de Gobierno. Por consiguiente, creo que la Ponencia no debe ir más allá de la declaración que hace.

Creo que lo mejor es ratificar las conclusiones que presenta la Ponencia, para que, aprobadas definitivamente por el Pleno, se eleven al Gobierno.

Concedida la palabra al Sr. Becerril, ratifica el pensamiento del Sr. Gutiérrez Cortines sobre la necesidad de dejar al Poder Público la plena libertad necesaria, para, en su día, adoptar las medidas legislativas convenientes, a fin de acomodar el ritmo de estas obras a su urgente necesidad nacional.

A continuación interviene nuevamente el Sr. Serret y manifiesta que los señores Gutiérrez Cortines y Becerril se han referido a dos proposiciones suyas, mas no han rozado la tercera, a fin de dar solución al problema de cómo se van a compaginar las necesidades del riego con las de la producción de energía eléctrica, y que, si se hubiera estudiado su armonización en su oportunidad, a la hora actual ese problema estaría resuelto, y a esta resolución habrá que llegar ahora o después.

El Ponente, Sr. Lucía, le contesta:

Quiero únicamente decir que no tengo que objetar nada, en principio, al con-



tenido de las conclusiones del Sr. Serret; que hemos tenido especial cuidado al redactar esta Ponencia, en lo que pudiéramos llamar su fórmula matemática, para que se obtengan términos homogéneos. No podemos mantenernos en cierto plano de abstracción y de alejamiento, para después vulnerar esa regla y pasar a otros planos de excesivo acercamiento. Temo que vulneraríamos ese principio, lo mismo si incorporáramos aquí las conclusiones del Sr. Serret, que lo que ha indicado el Sr. Gutiérrez Cortines. Creo que la conclusión está redactada con tal amplitud, que puede abarcar lo que el Sr. Serret decía. Por tanto, entiendo que los Poderes Públicos no sólo han de tener presentes, si lo estiman conveniente, las conclusiones de la Ponencia, sino también las conclusiones de todos los trabajos que aquí se han presentado. Sería un poco invadir el terreno privativo de las Obras Públicas señalar con tanto detalle la política que ha de seguir. Yo propondría que se respetara la primitiva redacción del párrafo.

El Sr. Presidente dice que, como tenemos la fortuna de tener al Ministro de Obras Públicas con nosotros, podemos recabar del mismo se atienda a las observaciones, muy justificadas, que acaban de hacerse, y que la razón de no incluirlas en la Ponencia es una razón de criterio de medida y de respeto al Poder Público.

Y, por último, el Sr. Lucía expone que la subconclusión d), no es cosa baladí y que problema idéntico y con caracteres graves ya se presenta en algunos países, entre ellos, en Norteamérica, y que tiene importancia que haya constancia de lo expuesto.

Con la aprobación de esta última subconclusión d) y la e), que es aceptada sin discusión, el Sr. Rubio da las gracias a cuantos intervienen en la preparación y discusión de la Ponencia, y dice, además que, como regalo al Congreso, el Ministro de Obras Públicas, Sr. Fernández Ladreda, nos ha de decir unas palabras. Los Congresistas, que ocupan totalmente el gran salón de actos de la Escuela, tributan en pie una gran ovación al Sr. Fernández Ladreda, que se dispone a hablar.

(Véase reproducción de su discurso en las páginas 163 y 164 del tomo I.)

Al terminar de hablar se reiteran con la misma intensidad los aplausos rendidos al comienzo de la intervención del Sr. Ministro, y restablecido el silencio, el señor Ministro de Obras Públicas de Portugal, pronuncia el discurso que asimismo figura reproducido, con su traducción, en las páginas 167 a 172 del tomo I.

Al finalizar el discurso el Sr. Ulrich es largamente aplaudido.

Se levanta la sesión para despedir a los Sres. Ministros, que se ausentan.

Se continúa la sesión para conocer los otros trabajos presentados a la Sección.

En ausencia de su autor, Sr. Muñoz Oms, el Sr. Miret hace una amplia exposición del trabajo "SISTEMATIZACIÓN de la CUENCA del RIBAGORZANA" que se reproduce a continuación y resume otro del mismo autor titulado "Estudio y Sistematización de los decursos hidroeléctricos de la cuenca del Noguera Ribagorzana y Plan de ordenación de trabajos".



## N.º 222. - Sistematización de la cuenca del Ribagorzana

Autor: D. FERNANDO V. MUÑOZ OMS

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

### CAPÍTULO I

#### ANTECEDENTES Y CONCEPCIÓN DEL PRESENTE ESTUDIO

En el Decreto de 5 de abril de 1946, según texto aparecido en el «Boletín Oficial del Estado», número 131, de 11 de mayo de 1946, se concedía, al Instituto Nacional de Industria, la reserva en firme del aprovechamiento integral de la cuenca del río Noguera Ribagorzana y se especificaban las condiciones según las cuales debía de entenderse concedida tal reserva.

De conformidad con el artículo del referido Decreto y por el de fecha 12 de julio de 1946, aparecido en el «Boletín Oficial del Estado», núm. 209, del 28 de julio de 1946, se encomendó al Instituto Nacional de Industria la creación de una empresa mixta, para la producción, transporte y suministro de energía eléctrica, con la misión fundamental de ejecutar el plan de aprovechamiento hidroeléctrico integral del río Noguera Ribagorzana y sus afluentes.

La referida empresa quedó constituida el 7 de diciembre de 1946, según escritura pública autorizada con la misma fecha por el Notario y Abogado de

Madrid don Federico Fernández Ruiz, y es su nombre oficial el de «EMPRESA NACIONAL HIDROELÉCTRICA DEL RIBAGORZANA» (abreviadamente ENHER), con su domicilio social en Barcelona, calle de Córcega, núm. 368.

Finalmente, y según Orden Ministerial del 10 de febrero de 1949, aprobada en Consejo de Ministros del 11 siguiente, fué oficialmente autorizada la transferencia a la ENHER por parte del Instituto Nacional de Industria, de los derechos y deberes que incumbían a éste en méritos del referido Decreto del 5 de abril de 1946.

Como consecuencia inmediata de la Orden de referencia y de las obligaciones emanadas de los aludidos Decretos, debía ser el estudio y presentación de un plan razonado de ordenación del conjunto de los aprovechamientos que han de constituir el sistema hidroeléctrico de la cuenta del Ribagorzana, el cual, dado el tiempo transcurrido y la intensa actividad desarrollada en el estudio de los recursos y posibilidades de la misma, cabe ser fundamentado y justificado en los estudios de carácter hidrológico detenidamente efectuados, y en los de elección de las mejores soluciones consideradas para la utilización y coordinación de los di-



ferentes tramos en que se pueden considerar dividido el río y sus afluentes.

El tiempo transcurrido ha permitido aprovechar la experiencia de la sequía, verdaderamente extraordinaria, del año hidráulico recién terminado, 1948-49, fuera de todo precedente, y cuyos datos se han recogido y considerado enteramente en el presente estudio.

Lógicamente, antes de abordar el estudio y montaje completo del sistema, en la forma que ahora lo hemos hecho, debíamos empezar por el análisis y estudio de las circunstancias concurrentes de carácter hidráulico, topográfico y geológico, las influencias de las comunicaciones, pueblos y servidumbres, etc., etc., y tener presente la situación de los posibles centros de consumo, conexiones e interconexiones, el factor general de la demanda, etc.; todos cuantos antecedentes ha sido dable proporcionarnos y, lo que es más fundamental, ponderar serena y reflexivamente, como consecuencia de la intensidad desplegada en el adentramiento y en el dominio técnico de la zona que nos ocupa, en estos tres años transcurridos desde la creación de la empresa.

Ante todo, era absolutamente preciso llegar al completo conocimiento de las posibilidades hidráulicas —léase, aportaciones y regímenes de las mismas, en sus distintos años y en los meses de ellos— en cualquiera de los puntos de la cuenca, objeto este que, si bien no resultaba fácil de alcanzar, dados los aforos existentes y el criterio seguido en su estima y coordinación, cabe considerarlo actualmente superado, tal como se podrá comprobar en el capítulo correspondiente de este trabajo, en forma, si no exacta, lo que no es posible, sí suficiente para garantizar una aproximación a la realidad, intrínsecamente imprevisible y variable, superior a la que podía ofrecernos una más larga experiencia en la estima ordinaria e individual de una serie de aforos, siempre de dudosa solvencia, en el transcurso de largos y atrasados períodos.

Conocidos los recursos hidráulicos, con sus aportaciones y regímenes, y determinados los lugares topográfica y geológicamente aptos para constituir embalses a base de lagos naturales y de vasos artificiales, era preciso, además de estudiar y concretar en líneas generales, las capacidades más económicamente convenientes que hay que asignarles, el definir y establecer un sistema de reservas anuales e hiperanuales —más prudente que los habitualmente seguidos hasta la fe-

cha, en que no se tenía la experiencia de las extraordinarias sequías últimamente presentadas— que permitiera, no sólo aumentar los consumos en los años secos y extremadamente secos con ligero detrimento de los regímenes de sequiaje de los años medios, sino garantizar a la vez la existencia de unas reservas de agua al terminar un año hidráulico extremadamente seco, por lo menos igual a las precisas para hacer frente, con su gasto durante el sequiaje del nuevo año, a las diferencias entre el régimen de consumos normalmente previsto y los recursos fluyentes propios del año nuevo, lo que, aún en el supuesto de resultar de tipo medio, sería imposible lograr en caso de comenzar el año con las reservas agotadas por completo. Esta última circunstancia es la que se da desgraciadamente en los sistemas eléctricos fundamentales según las bases que clásicamente venían rigiendo, con tan grave perjuicio para la economía general, puesto que a los daños sufridos durante el año extremadamente seco se le añaden los de los meses del sequiaje siguiente, aun cuando puedan los mismos resultar ya normales.

Una vez elegidos los embalses que se hayan de constituir y adoptado un criterio en materia de reservas, y habida cuenta de que los regímenes mensuales de descarga de los embalses habrán de ser en cierta forma, en razón inversa a la abundancia de los recursos fluyentes, para compensar las irregularidades de los saltos con aprovechamiento de aguas no regularizadas, fué menester determinar y comparar las distintas soluciones que en cada caso se nos ofrecían para el mejor aprovechamiento de dichos embalses, naturales o artificiales, con sus saltos correspondientes, y, asimismo, de los tramos del río cuya utilización debía ser forzosamente realizada a base de canales seguidos de sus respectivos saltos, y terminar el estudio con la elección de aquellas soluciones que, a la par de ser las más económicas, permitieran salvar las faltas de continuidad a fin de no desperdiciar los desniveles útiles de los ríos y, a la vez, conseguir el menor número de centrales posible para simplificar el sistema y ahorrar gastos de explotación.

Al explicar, en el capítulo correspondiente, cuáles han sido las soluciones comparadas y cuáles las escogidas, se comprobará que estuvimos atentos a las posibilidades de trasvases de unas cuencas a otras, fuesen éstas pequeñas o grandes, con el fin de arrancar el máximo provecho posible de las circunstancias oro-



gráficas del lugar, en orden a la obtención de las mayores producciones con los menores gastos posibles de instalación y de explotación, a base, siempre, del máximo respeto de las servidumbres posteriores, si las había.

Hemos comprobado el no ser necesario para nuestro sistema recurrir a bombajes para el almacenamiento de aguas en los períodos de deshielo o bien durante las horas de poca carga para el mayor gasto en las horas de la máxima demanda, en razón a que, afortunadamente, y gracias a la bondad del sistema constituido, no se producen sobrantes dignos de tal empeño en relación con las posibilidades técnicas y de lugar que se nos presentan para tal clase de extremados aprovechamientos.

Por lo que concierne a los aprovechamientos de saltos sin embalse propio para regulación de las aguas afluentes (o sea, de caudal fluyente), tuvimos que distinguir los caudales de las cuencas propias no regularizadas y aquellos otros procedentes de los embalses que en ellos influían. Se comprende que los primeros son totalmente irregulares y, por lo mismo, que había que someterlos a un aprovechamiento tope —si otras razones no aconsejaban lo contrario por la mayor capacidad que hubiera que dar a las instalaciones— con el fin de no incurrir en una excesiva desproporcionalidad entre el mayor gasto que hubiera reportado la utilización total de dichos caudales y el beneficio que convenía obtener con los aludidos excesos, los cuales, por otra parte, poco valor cabía asignarles, en mérito a su corta permanencia y a la coincidencia con los períodos o momentos de máximas disponibilidades hidráulicas en todos los saltos. En cambio, los segundos, o sea los procedentes de los embalses de aguas arriba, no sólo resultan de total aprovechamiento, sino que deben perseguirse por aumentar la cantidad de aportaciones, prácticamente utilizables y por darse precisamente en las épocas más precarias, como consecuencia del régimen ya explicado establecido en los embalses.

Con las directrices hasta aquí expuestas, fué posible llegar a la concreción del sistema, con sus diferentes saltos de embalse y de canales. A su vez, conocidas las alturas de salto utilizables —prácticamente fijas y topográficamente determinadas para los aprovechamientos a base de lagos y canales, y variables, pero determinables en función de los regímenes de desagüe, para

el caso de grandes embalses artificiales— resulta ya fácil determinar las producciones en kwh. para cada uno de los aprovechamientos y para los distintos meses de los distintos años tipos elegidos, los cuales, sea dicho de paso, fueron adoptados tres: uno, medio, otro seco, correspondiente al año hasta ahora tomado como patrón de esta clase, o sea 1928/29, y otro, extremadamente seco igual al del último año sufrido, es decir, el de 1948/49.

Determinadas las producciones posibles y, por ende, las potencias medias disponibles, quedaba planteado otro importantísimo problema y de cuya solución dependía, en gran parte, el acierto y bondad del sistema. Nos referimos concretamente al establecimiento del *régimen diario* que hay que señalar a los aprovechamientos con embalses y, por tanto, a la determinación de sus caudales y potencias máximas y mínimas, así como, consecuentemente, las influencias sobre los saltos de canales situados aguas abajo y que, debiendo ser favorables, podían resultar excesivamente onerosas e incluso perjudiciales.

Se comprende que la retención diaria de las aportaciones en los embalses durante determinadas horas, y, por contra, su desagüe en las horas de aprovechamiento, ocasionan no solamente unas concentraciones de energía en ellos —muy necesarias para poder hacer frente a las horas de punta de la demanda en beneficio del sistema, ya que, de otra manera, o bien se desperdiciaría energía en las horas muertas, o no se podrían contratar los suministros por las puntas máximas necesarias para dar salida a la total producción— sino que producen unas avenidas de agua que repercuten en los aprovechamientos situados aguas abajo, los cuales, si son a base de canales, con caudal fluyente, requieren unas capacidades mayores, que han de resultar compatibles con los mayores beneficios alcanzables en sus propios saltos. Si los mayores caudales que se producen no se hallan desproporcionados con la utilización de las mayores dimensiones de las obras o instalaciones, y si llegan a tiempo, es decir, si llegan a saltar en las horas de la máxima demanda, la influencia resulta favorable; si, por el contrario, aquéllos resultan ser excesivos y, principalmente, si por el desfase que se produce por los tiempos empleados en el recorrido de las aguas desde la salida de la central de embalse hasta las que se considera la energía en los saltos influídos, llega a producirse en



las horas vacías o de escasa demanda, entonces, la influencia, lejos de resultar beneficiosa, pasa a ser perjudicial.

Por otra parte, se comprende también que, en la fijación del régimen diario, había que tener en cuenta la repercusión de las concentraciones de aguas en las tuberías, procurando se diera principalmente en los saltos de menor longitud de tubería, así como también la circunstancia de mayores o menores distancias de transporte de la energía producida, tendiendo a que las líneas más alejadas fuesen las menos cargadas o, por mejor decir, las de aprovechamiento más constante.

La apreciación de todos estos factores en relación con las exigencias de la demanda, más las contrarregulaciones, por así llamarlas, de los embalses y los contraembalses, debía constituir la esencia y secreto de la bondad del sistema.

Por lo que hace referencia a las exigencias de la demanda, o por mejor aclarar, a la adaptación que conviene conseguir de las producciones al régimen de consumos de energía, con sus puntas máximas y sus gastos de base, si bien estimamos que nos hallamos en período de franca evolución, de tendencia favorable, como consecuencia de los acentuados consumos de noche a medida que crece la industrialización del país y por el incremento notable de los aparatos domésticos (calentadores de agua, etc.), a medida que aumenta el nivel de vida de la nación, y, también, por la influencia notabilísima que se ejerce en los sistemas por las interconexiones de energía hidráulica y térmica —antes locales, ya hoy día peninsulares y posiblemente el día de mañana continentales— hemos querido situarnos en terreno de la máxima prudencia y, así, hemos admitido el régimen de consumos que venía dándose en la región catalana —lógicamente digna de ser tenido en cuenta para la colocación de nuestra energía— antes de las actuales restricciones.

De los caudales máximos determinados se infieren las capacidades de las instalaciones y las potencias máximas disponibles en cada mes, por lo que, partiendo de la demanda máxima del año que, de acuerdo con la hipótesis de que antes hablamos se presenta durante el mes de enero, cabe comprobar ya, si las puntas máximas mensuales de la demanda es posible satisfacerlas con los máximos de potencia disponibles, y, determinar a la vez, los excedentes de producción mensuales. En los cuadros que se adjuntan en el plan

completo se observa que el sistema resulta perfectamente compensado anualmente, aunque lógicamente deberá ser completado con la térmica prevista de Escatrón para suplir los déficits de los años secos y poder comprometer y asegurar en cualquier circunstancia los importantes suministros de que es capaz la cuenca del Ribagorzana.

Finalmente, conocidas las potencias máximas disponibles, se llega a concretar las potencias instaladas, teniendo en cuenta para ello, principalmente y en lo que concierne a los saltos con embalses, la obtención del mayor provecho de las características que se deben fijar para las máquinas, en mérito al régimen de caudales máximos determinados en relación con las alturas del salto más o menos normales.

Para un mejor conocimiento de los saltos, además de determinar, como se ha dicho, las producciones de que son capaces, se han deducido los kwh. que les son imputables como consecuencia de las influencias positivas que ejercen sobre los de aguas abajo, o de las deducciones a que en rigor hay que someterlos por las repercusiones favorables que han recibido de los de aguas arriba.

A análogos efectos y con el fin de facilitar en su día la determinación de las tarifas que haya que aplicar en la venta de la energía producida según sean los saltos que entren en servicio, al igual que el coste admisible de la energía térmica que se necesita como complemento de la hidráulica que produzcamos, en todo el estudio se ha procurado diferenciar los recursos hidráulicos según la clase de energía susceptible de producir, si permanente, eventual o de la llamada de puntas. La diferenciación aludida habrá de permitirnos la reducción a una sola unidad o patrón de las diversas clases de energía para cada uno de los saltos, pero, como quiera que el asunto es bastante complejo y no precisa a los efectos de la presente sistematización, de momento nos limitamos a rectificar virtualmente las producciones a base de referirlas a energía consumible y de entender como tal la medida mensual del período de sequía extendido a todo el año. A dichos efectos, a los excedentes del período de deshielo se los afecta de un coeficiente que estimamos igual a un tercio, precisamente, en razón al escaso valor que cabe asignarles en relación al de las unidades de la demanda ordinaria.

A continuación se procedió a determinar los pre-



supuestos de los aprovechamientos tras un concienzudo estudio de los precios unitarios aplicables, amparados en la experiencia propia adquirida en el transcurso de las obras realizadas y en las adquisiciones efectuadas hasta la fecha referentes a máquinas y equipos eléctricos, al igual que se debían estimar los porcentajes de aumentos por gastos de Dirección y generales de la empresa.

Una vez en posesión de los importes que requieren la realización de cada aprovechamiento, era ya sencillo obtener, con los datos deducidos anteriormente, los costos relativos por caballo instalado y el capital por kwh. producible, real o virtual o aproximado imputable en año medio, al igual que otros costos unitarios de interés.

Hasta aquí hemos expuesto cuál ha sido la concepción que nos ha dominado en el estudio efectuado para llegar a la concreción acertada de las obras, lo cual, como puede adivinarse, no ha resultado ciertamente fácil. Las directrices generales, en efecto, ha sido menester rectificarlas varias veces como consecuencia de la complejidad del asunto y de las múltiples facetas que ofrece y, en gran parte, como consecuencia de que queríamos montar un sistema que armonizara con el máximo provecho de las vastas y dispares características de la cuenca y en el que quedasen concatenados todos sus aprovechamientos. Por otra parte, y a tal efecto, no hemos podido contar con patrón o modelo alguno por nosotros conocido que nos sirviera de guía u orientación, en razón a que, ordinariamente, si es cierto que se crean sistemas hidroeléctricos, en general ha sido a base de aprovechamientos más o menos aislados sucesivamente puestos en relación, pero nunca con el alcance y concepción «a priori» que merecía el nuestro por la extensión y variedad de la cuenca, por hallarse esta última enteramente virgen, y por el acierto que se tuvo en las altas esferas al querer abordar este conjunto de acuerdo con las tendencias modernas que imperan en estos asuntos hidroeléctricos, cada vez más revolucionarias por resultar siempre pequeñas por ambiciosas que parezcan.

Finalmente, para completar el plan, una vez se hallaban concretadas las obras que hay que emprender, con sus características esenciales, era preciso fijar el programa para la ejecución de los proyectos, trabajos e instalaciones preliminares, construcción y desarrollo de las obras, lo cual así se ha hecho teniendo

en cuenta principalmente el factor tiempo, o, por mejor decir, la prisa que nos acucia, tanto en razón a los plazos señalados en el Decreto que concede la reserva, como por las exigencias de los momentos angustiosos que vivimos en materia de energía eléctrica. Por estas causas es por lo que inicialmente se prevén las obras más fáciles de realizar, que son, en general, las más próximas a los accesos existentes, sin perjuicio de que seguidamente se trate de emprender aquellas de mayores y mejores producciones, o aquellas otras complementarias de las primeras.

Expuestos los antecedentes, objeto y concepción general del estudio y de la sistematización de la cuenca que nos ocupa, pasamos, en los capítulos siguientes, a detallar, completar y justificar las bases e ideas que nos han dominado, así como a exponer los datos utilizados y los resultados y concreciones a que se ha llegado.

## CAPITULO II

### DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA

#### 1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA

La cuenca del Noguera Ribagorçana tiene su cabecera en la vertiente sur de la parte de Pirineos Centrales, al NO. de la provincia de Lérida y extremo nororiental de la de Huesca, y se prolonga hacia el sur hasta Corbins, cerca ya de la capital de la provincia de Lérida.

Ocupa una extensión total de 2.036,6 km<sup>2</sup>, repartidos entre las provincias de Lérida y Huesca. Es el ancho máximo de la misma, en la zona de la cabecera, de unos 32 km., medidos sobre un paralelo, y su longitud total, medidas sensiblemente en la dirección de un meridiano, de 108 km.

Geográficamente está comprendida entre los meridianos 4°06' y 4°41' al este del que pasa por Madrid y los paralelos 42°39' y 41°40'. Está limitada: al norte —entre el Pico Mulieres y el Colomés— por la cuenca del Garona (o sea vertiente norte de los Pirineos, aun cuando la misma sea territorio español, y no francés, como sucede con el resto de la vertiente norte); al este por las cuencas del Noguera Pallaresa (u otras parciales pertenecientes a la misma, como



la del Flamisell) y el Segre, y al oeste por las del grupo Cinca (Esera, Isabena y otros). El extremo sur termina con la desembocadura del Noguera Ribagorzana al Segre, que tiene lugar entre Balaguer y Lérida, a unos 8 km. aguas arriba de dicha capital.

Es de destacar la circunstancia de que en los tres grupos de cuencas citadas, Garona, Noguera Pallaresa, Segre y Cinca (con el Esera e Isabena), existen ya grandes aprovechamientos hidroeléctricos —contrariamente a las circunstancias que hasta ahora se daban en el Ribagorzana, donde no había un solo aprovechamiento industrial, con la salvedad de algún molino—. Hay, asimismo, importantes proyectos en cartera, todo lo cual habrá de favorecer extraordinariamente los enlaces e interconexiones con el sistema que intentamos establecer en el Noguera Ribagorzana.

## 2. DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA

La cuenca del Ribagorzana, con la salvedad del relativamente corto tramo inferior, donde encontramos los llanos de Balaguer, es esencialmente montañosa.

Su cabecera, según se ha dicho, está constituida por la vertiente sur del tramo del Pirineo Central comprendido entre el macizo de Maladeta, en el oeste, y el pico de Solomás y región de Capdella al este, y está coronada por varios picos, muchos de ellos de más de 3.000 m. de altitud, tales como los de Margalida y Rusel, de más de 3.200 m. —que constituyen el extremo oriental de la Maladeta y en cuyos glaciares se forma el río Salencas, afluente del Ribagorzana—; el de Mulieres (3.010 m.), Vallibierna (3.010 m), Montartó (2.830 m.), los dos Comolo-Formo (uno de 3.067 metros y otro de 3.030 m.), el Biciberri (2.951 m.), Comolo Espada (3.014 m.), Colomé 2.932 m.), Pala Alta (3.001 m.), etc.

En dicha cabecera se forman los dos ríos principales de la cuenca. Es uno el propio Noguera Ribagorzana, que nace al pie del pico de Mulieres (provincia de Lérida) y al cual afluyen, dentro de la misma cabecera, los ríos Salencas y Llauset, ambos en la provincia de Huesca y recogiendo el primero las aguas del macizo más alto de toda la cuenca. El otro es el Noguera de Tor, procedente del circo de montes y lagos que coronan la comarca de Caldas de Bohí (conocido por sus famosas y abundantísimas aguas termales), y a cuyo río afluye también el San Nicoláu, procedente de la parte más oriental de la cuenca y

en cuyo valle se encuentra el parque de Aigues Tortes.

El Noguera de Tor y el Ribagorzana confluyen a un kilómetro, aproximadamente, aguas arriba de Pont de Suert. Recibe poco antes, el segundo, la aportación del río Baliera, que recoge las aguas de la parte más occidental de la cabecera de la cuenca. Prescindiendo de dicha cuenca, la propia de cada una de las otras dos tienen unas superficies de 188,7 km.<sup>2</sup> para la del Ribagorzana, y 248,8 km.<sup>2</sup> para la del Tor, resultando para la primera, al adicionarle el Baliera, un total de 293,5 km.<sup>2</sup>

Aun cuando tanto en la cuenca alta del Ribagorzana como en la del Tor hay lagos; puede decirse que es en la última donde se encuentran en mayor número. Allí tenemos, entre otros, los de Caballers, Negro, Travesany y Monges, en los cuales se forma el Noguera de Tor, así como los Llebreja, Llong, Contraig, Sarradé, Negro y otros en la cuenca del San Nicoláu. En la del Ribagorzana cabe sólo considerar los lagos Llauset, Anglios y Biciberri, pues el Redó no tiene prácticamente ninguna cuenca afluente.

Prevedemos el utilizar los referidos lagos en su mayor parte recreciéndolos con presas que cierran sus emisarios, para permitir la constitución de reservas, cuya importancia es dable apreciar teniendo en cuenta el valor que en kwh. tiene el m.<sup>3</sup> en ellos embalsado, al aprovechar el desnivel suma de todos los saltos de aguas abajo. En la cuenca del Tor prevemos constituir una reserva de 27,7 millones de m.<sup>3</sup>, que significarán unos 75 millones de kw.-h., y en la del Ribagorzana, 11,5 millones de m.<sup>3</sup> equivalentes a unos 40 millones de kwh.

En la zona media, la cuenca del Ribagorzana está atravesada transversalmente por importantes sierras, paralelas a los Pirineos y en las cuales ha tenido que abrirse el río angostos y profundos estrechos, algunos de los cuales son aprovechados para constituir, mediante su cierre con presas, los embalses y saltos de la referida zona media.

La primera o más al norte de dichas sierras, es la de San Gervás, en la cual se origina el estrecho de Escalles, emplazamiento para una presa de 115 m. de altura, con lo que se constituye el primer gran embalse artificial del sistema. Al sur de Pont de Montaña se encuentra la importante sierra de Montsech, en la cual se forma el congosto de Montrevey, el más impresionante de los del Ribagorzana por su estrechez



y profundidad. Luego nos encontramos con los de Pertusa, Fet, Blancafort, Canelles (previsto éste para ubicar allí una gran presa de embalse), Pas de la Sabina, Coma de Noguera y Sta. Ana.

Aguas abajo de Sta. Ana, y hasta la desembocadura del Ribagorzana al Segre, se encuentra el tramo inferior del río, caracterizado por sus terrenos, llanos y cultivados, a cota más baja de toda la cuenca, está en el punto de confluencia de los dos ríos citados; la de 175 m. aproximadamente.

Lo abrupto de los tramos superior y medio de la cuenca ha sido la causa de la escasez de vías de comunicación de que adolece aquella comarca. En la parte norte no hay más accesos que la carretera desde Poblade Segur a Pont de Suert, que hoy día se está continuando, sin embargo, hasta la boca sur del túnel de Viella, permitiendo ya, mediante pistas provisionales, el paso al Valle de Arán. Se está terminando también la carretera transversal desde Vilaller a Castejón de Sos (Esera). En la zona media no hay más acceso que los de Tremp por un lado y Benabarre por el otro a Pont de Montañana y a Arén, aparte una pista privada que desde el llano de Ager llega a Corsá, aguas abajo de Montrevey, donde hay unas minas de carbón.

El programa de desarrollo de los aprovechamientos hidroeléctricos del Ribagorzana exigirá, pues, la pronta construcción de nuevas carreteras —por otra parte ya incluidas en el plan de Obras Públicas— que remediará las dificultades hasta ahora habidas. Están, a tal efecto, ya en construcción y en parte terminadas algunas de ellas.

Como parte integrante de la presente descripción de la cuenca, no podemos dejar pasar por alto —aun cuando no se refiera precisamente al potencial de energía hidráulica— la cita de las riquezas naturales de carácter mineral, forestal y también piscícola.

Hoy día se explotan ya, dentro de la zona pirenaica, minas de carbón y de plomo argentífero, pero existen, además, yacimientos de minerales distintos, entre ellos de hierro y cobre, así como posibilidades, incluso, de petróleo, por lo cual figura una extensa zona reservada ya para el Instituto Nacional de Industria.

Por lo que respecta a la riqueza forestal, son de mencionar los bosques de abetos, pino negro y hayas que cubren extensas zonas de la cabecera de la cuenca.

La construcción de las carreteras que las obras hidroeléctricas exigen, dará un indudable valor, del que

hoy día carecen, a todas las riquezas que cabe considerar en potencial; pero, además, la disponibilidad de energía eléctrica con sus centros de producción al lado de los de aquellas riquezas, permitirán augurar unas posibilidades magníficas, al centralizar en la propia cuenca y cerca, por tanto, de las primeras materias y de las fuentes de energía los centros industriales de transformación y fabricación.

Finalmente, y a título accesorio, es de destacar la carencia de pueblos en el tramo de la cuenca, circunstancia que ha de facilitar extraordinariamente la constitución de los embalses que en la misma se prevén.

### 3. GEOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RIBAGORZANA

La cuenca del Ribagorzana, como enclavada en la vertiente meridional del Pirineo, morfológica y geológicamente, se halla caracterizada por los fenómenos grandiosos que dieron lugar a la formación de tan importante cordillera.

Aun cuando se encuentran terrenos paleozoicos, como se sabe, el Pirineo no existía antes del movimiento herciniano, y aun puede decirse que su principal emergencia tuvo lugar mucho después, al final del eoceno, en correspondencia con el último gran movimiento tectónico, o sea el Alpino, el cual, de hecho, salvo las contingencias promovidas por el glaciario, nos dejó ya la gran estructura terrestre en la forma que ahora la observamos.

Al presentarse el movimiento herciniano, en el gran mar Thetys, surgen, a modo de grandes pilares terrestres, nuestra Meseta castellana y al Macizo Central de Francia, y a la vez, se forman unas arrugas en la corteza terrestre, en forma de islas oblongas en la dirección este a oeste, coincidiendo con el eje de los Pirineos y que, en realidad, constituyen los prolegómenos de lo que después ha de ser la gran Cordillera.

Este primer tiempo de la formación del Pirineo se advierte perfectamente en nuestra cuenca, con las discordancias manifiestas que se presentan entre el permotriás y el carbonífero, lo cual se aprecia mejor en Erill Castell y en otros puntos de la cuenca carbonífera.

Advenida la época tranquila del mesozoico, se constituyeron las grandes sedimentaciones del triás, del cretáceo y del eoceno, cuyas formaciones, en un principio horizontales se vieron fuertemente plegadas, al



igual que los terrenos del paleozoico que formaban la base —como se ha dicho, ya ondulados por los grandes movimientos tectónicos anteriores, principalmente el herciniano— por el enorme empuje tangencial procedente del sur como consecuencia probable del desplazamiento hacia el norte de la Meseta Central castellana y de la solidez del Macizo Central francés que parece quedó estático.

Este gran movimiento, coetáneo del que promovió la emergencia de los Alpes, hizo que las arrugas antes aludidas se levantaran poderosamente, poniendo al descubierto el substratum, el cual debía ser puesto de manifiesto más poderosamente después por la erosión, formándose así lo que llamamos cadena axial de los Pirineos y que, en nuestro caso, no es otra cosa que la divisoria entre la cuenca del Ribagorzana y la del Garona.

El empuje tangencial que promovió la formación del Pirineo, siendo de sur a norte, se comprende que los pliegues y las grandes fallas, en general, tengan la dirección este a oeste, y asimismo, por tener la cuenca del Ribagorzana la dirección de norte a sur y nacer el río en la zona de los máximos esfuerzos emergentes, se comprende que el río vaya cortando perpendicularmente todos los terrenos geológicos, desde los más antiguos a los más modernos, a medida que sus aguas van descendiendo, e igualmente que la violencia de los pliegues y de las dislocaciones vaya perdiendo virulencia en razón inversa a la lejanía del lugar que se considere.

Salvando los fenómenos y circunstancias de carácter local, el esquema tectónico y paleogeográfico de la cuenca puede comprenderse considerando las siguientes secciones en que dividimos el perfil del río para mayor claridad de exposición:

- a) Sección axial o de cabecera, comprendida entre las cotas de 3.010 y 1.400 m., con una longitud aproximada de 10 km.
- b) Sección de los terrenos más antiguos, principalmente devoniano, comprendida entre las cotas de 1.400 y 950 m., con una longitud aproximada de 15 km.
- c) Sección del gran sinclinal central delimitado por dos grandes fallas y situado entre las cotas de 950 y 440 m. con un recorrido aproximado de 55 km.

- d) Sección de pequeños sinclinales y anticlinales, comprendida entre las cotas de 440 y 300 m., con longitud aproximada de 25 km.
- e) Sección de los terrenos terciarios comprendidos entre las cotas de 300 y la de 170 m., de la confluencia con el Segre y de una longitud aproximada de 27 km.

La primera sección se halla constituida por las grandes masas emergidas de granito, cuyo levantamiento arrastró a los terrenos paleozoicos que sustentaban y de los cuales, pese a la casi total erosión de ellos, todavía se conservan a uno y otro lado de la divisoria pequeñas pinzaduras. En esta zona es donde el glaciismo produjo sus grandes efectos durante las épocas modernas del plioceno y pleistoceno, dejando un gran número de ibones susceptibles de aprovechamiento hidráulico, al igual que cauces de riachuelos colgados y un buen número de morrenas.

La sección segunda se halla formada por una gran masa de terreno devoniano, con sus areniscas antiguas y calizas marmóreas agrietadas, entre las que surge un pequeño anticlinal siluriano bien caracterizado por potentes bancos de pizarras ampolíticas del gotlandense y que se presentan en las inmediaciones de los pueblos de Senet y Aneto.

Este tramo se halla perforado y, en parte, digerido por la gran masa porfídica de la Sierra de Posa, en la cual arman los filones, que allí se explotan, de plomo.

Pegado al devoniano, por el sur, y probablemente ocasionada por la debilidad de la charnela de un pequeño anticlinal básicamente carbonífero, se observa larga y potente barrera de meláfidos que, yendo de este a oeste, viene a formar el pilar norte de gran sinclinal mesozoico que constituye el rasgo verdaderamente característico del Ribagorzana medio.

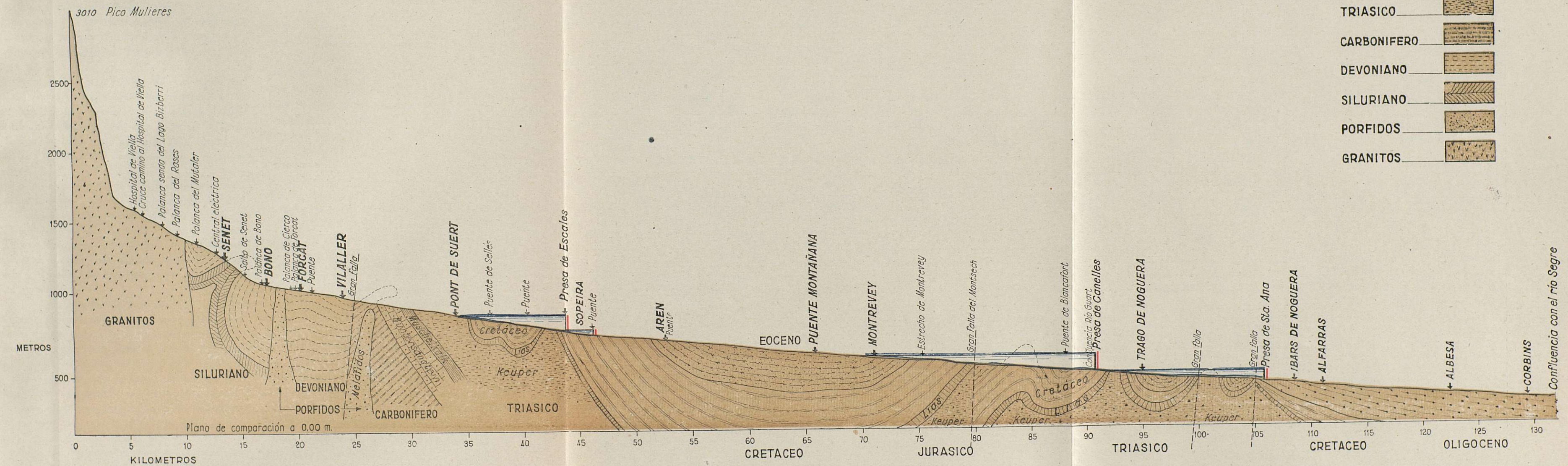
Apoyándose sobre los aludidos meláfidos y antes de entrar en los terrenos secundarios, asoma el carbonífero en clara discordancia con los terrenos superiores del permotrias, por lo que se estima que aquél pertenece al piso westfaliense. Este asomo carbonífero tiene un gran recorrido en el sentido transversal al río y, como es sabido, es objeto de explotación en las minas llamadas de Malpás. Sobre el carbonífero se apoyan unos potentes bancos rojos que estimamos pertenecen al permiano, piso Rotliegende, el cual, a su vez, soporta el Zechstein, según nos pareció observar en un sondeo



# PERFIL GEOLOGICO DE LA CUENCA DEL NOGUERA RIBAGORZANA SIGUIENDO EL CURSO DEL RIO

— ESCALAS —  
 VERTICAL 1:20.000  
 HORIZONTAL 1:250.000

- OLIGOCENO
- EOCENO
- CRETACEO
- JURASICO
- TRIASICO
- CARBONIFERO
- DEVONIANO
- SILURIANO
- PORFIDOS
- GRANITOS









efectuado para descubrir la prolongación de la cuenca carbonífera por debajo del triás subsiguiente. Esta zona se presenta fuertemente complicada, con pequeños hundimientos y levantamientos del devoniano, que alguno de los muchísimos geólogos que los han estudiado señalan no como enraizados, sino como importantes cabalgaduras o cobijamientos.

Sea lo que fuere, a los efectos de la explicación de los rasgos esenciales del corte geológico de la cuenca, diremos que los estratos carboníferos se hallan recubiertos por el permotriás, el cual se presenta potentísimamente y se sumerge hacia el sur para formar la rama norte del gran sinclinal que ahora consideramos.

Este gran sinclinal se ondula y, a manera de diapiro, el triás aflora, con las clásicas ofitas acompañantes, cerca del paso de Escales y ligeramente aguas arriba del emplazamiento escogido para la presa de dicho nombre.

El fondo de esta gran cubeta está constituido por el triás, el cual revela su fuerte individualidad en la rama norte con la presencia de los tres pisos Bunter-sandstein, Muschelkalk y Keuper, y surge al final, por debajo del triás, junto a la gran falla que limita por el sur el tramo que hemos señalado con la letra c).

Apoyándose en el triás, va el liás en pequeño espesor sobre éste y se presenta vigorosamente el cretáceo con manifestaciones de casi todos sus muchos pisos. Finalmente, en el centro del sinclinal y a manera de tapadera de la parte central de la cubeta, se encuentra el eoceno, a base de margas alternadas con molasas y también con manifestaciones vigorosas de calizas numulíticas.

Mención especial merece la gran falla que hemos tomado como linde de las secciones convencionalmente señaladas por las letras c) y d). Trátase, en efecto, de la falla bien conocida existente al sur del Montsech y cuyos labios, al denotar un falso contacto entre el triás y la parte norte con el eoceno de la parte sur, denotan también un hundimiento de la parte sur verdaderamente asombroso, habida cuenta del enorme espesor que muestran en esta zona todo el cretáceo y el liás.

La sección d), convencionalmente llamada por nosotros de pequeños sinclinales y anticlinales, está soportada todavía por el triás, el cual se manifiesta en tantas cuantas ocasiones puede hacerlo. Sobre el Keu-

per se presenta, análogamente a la sección de aguas arriba, el cretáceo y el eoceno.

Finalmente, pasado el estrecho de Santa Ana, los estratos cretáceos, definitivamente, se sumergen hacia el sur para no aflorar ya más, y sobre ellos yacen el eoceno y el oligoceno, que alcanza y prosigue más allá de la confluencia del río con el Segre.

A la descripción efectuada, con la pretensión única de destacar los rasgos característicos de la cuenca considerada desde el punto de vista geológico, hay que añadir que, como es natural, la erosión ha obrado secularmente en los terrenos duros, llegando a abrir congostos de aspecto verdaderamente importante como los de Borrugat, Escales, Montrevey, Blancafort, Canelles, Pas de la Sabina y Santa Ana, y asimismo son de observar los efectos de la erosión, laminando y ensanchando los valles de aquellos terrenos que podríamos llamar «blandos», constituyendo en su conjunción posterior con los «duros» indicados para cierres, los vasos de los embalses que necesitamos prever.

Al hablar de embalses hemos de destacar que los estratos de los diferentes terrenos, y, en general, también las fallas, en razón a la constitución tectónica de la cuenca, se presentan en dirección normal a la del río, con lo cual, al no haber, en general, valles paralelos a corta distancia, las pérdidas por filtraciones son menos de temer, tanto más cuanto que en algunas ocasiones los bancos buzan en sentido contrario a la corriente del agua y los cierres previstos protegidos por pantallas de margas, en conexión con el substratum que, al ser triásico, asegura ya de por sí la más completa impermeabilidad.

Por lo que respecta a la sustentación de los canales, salvo el paso de alguna zona de morrenas y de depósitos cuaternarios situados en la zona de cabecera, no son de prever dificultades especiales, pues, incluso en la parte de los terrenos eocenos, la estabilidad se halla asegurada con los bancos de las areniscas intercaladas en las margas, generalmente horizontales, por lo que se debe recomendar, no obstante, que en dichos casos se recurra en lo posible a soluciones en túnel.

Como complemento del presente estudio geológico de la cuenca, se adjunta un perfil del río, con sus cotas y recorridos, en el que se han señalado, «grosso modo», las principales características tectónicas y estratigráficas.



#### 4. RIEGOS Y SERVIDUMBRE QUE HAY QUE RESPETAR Y PREVISIÓN DE NECESIDADES FUTURAS

En la cuenta del Ribagorzana y aguas arriba de Santa Ana, sólo existen pequeños regadíos, en su mayor parte sin legalizar, pero cuyo mantenimiento y en cierto modo mejora (aun cuando con la debida regularización de los usos) prevemos, naturalmente, mantener.

También hay algunos molinos y serrerías de muy poca potencia, para todos los cuales ya prevemos en nuestros proyectos, bien el acuerdo directo con sus concesionarios o usuarios (adquiriéndolos o comprometiéndonos a compensarlos con cesión de energía y potencia de nuestros saltos), o la expropiación, de acuerdo con las facultades que nos otorgue la concesión de tal derecho.

Aguas abajo de Santa Ana, en cambio, existe la obligación —objeto principal de la constitución del pantano del mismo nombre— de asegurar importantes regadíos existentes, más la ampliación de aquéllos o, incluso de otros nuevos, así como el abastecimiento de aguas de Lérida y el mantenimiento de las pequeñas instalaciones industriales de la acequia de Piñana.

#### 5. DIVISIÓN DE LA CUENCA

Consideramos dividida la cuenca del Ribagorzana en tres partes, que llamamos: Superior o de cabecera, Media y Baja.

La primera es la que queda aguas arriba de Pont de Suert y comprende todos los saltos de las cabeceiras (del tipo de galerías forzadas que arrancan de los lagos, con posibilidad, por tanto, de establecer régimen de puntas) y los aprovechamientos de caudal fluyente, más o menos influído, sin embargo, por los anteriores.

La segunda comprende, en esencia, los saltos con embalse de regulación, más los del caudal fluyente intermedios, regularizados, sin embargo, estos últimos, en cuanto a su régimen anual hace referencia, por el embalse de Escalles.

Finalmente, la última, aguas abajo de Santa Ana, comprende los terrenos llanos y es indicada, por tanto, para regadíos, pero no para el aprovechamiento industrial.

### CAPÍTULO III

#### ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS

##### 1. OBJETO DEL PRESENTE CAPÍTULO

La finalidad del presente capítulo es la determinación de los recursos hidráulicos aprovechables, con sus regímenes mensuales, en cualquier punto del Ribagorzana y en cualquier año o años hidráulicos, principalmente en los que se juzgue interesante adoptarlos como tipos, con vistas a determinar los volúmenes utilizables y su repartición dentro del año, para los distintos aprovechamientos hidroeléctricos previsible.

Dicho objeto no ofrecería dificultad si se dispusiera de datos de aforos correctos, recogidos en gran número de puntos de la cuenca, durante largos períodos, dentro de los que quedarán incluidos los años hidráulicos característicos o tipos.

Por no ser éstas las condiciones en que podemos operar, hemos tenido que realizar un examen cuidadoso de todos los datos de aforos disponibles relativos a diversos años y tramos de la cuenca, para deducir de ellos ciertas relaciones o leyes que nos resuelven la finalidad expuesta en forma, si no exacta, que merezca ser considerada como suficiente.

##### 2. DATOS DE AFOROS DISPONIBLES

Los datos de aforos que se poseen hasta la fecha, relativos al Noguera Ribagorzana o a sus afluentes, son los tomados en las estaciones de aforos que a continuación se indican, correspondientes a los períodos que también se señalan:



Estación	Río	Períodos de los que poseen datos
San Nicolau en Bohí (inmediatamente aguas arriba de su confluencia con el Tor).	San Nicolau.	Desde enero 1946, pero disponemos también de los de una estación preexistente de Fuerzas Hidráulicas del Alto Pirineo (FHAPSA), desde 1920 a 1935, aun cuando con algunas intermitencias.
Tor en Bohí (inmediatamente aguas arriba de la confluencia con el San Nicolau).	Tor Superior.	Desde septiembre 1945, pero tenemos también los de una estación preexistente de FHAPSA, desde 1920 hasta 1930, aun cuando con algunas intermitencias.
Barruera.	Tor.	Desde el 2 de febrero de 1947.
Castilló de Tor.	Tor.	Desde el 24 de noviembre de 1946.
Baliera.	Baliera.	Desde el 7 de junio de 1946.
Ginaste.	Ribagorzana.	Desde octubre 1946 tenemos datos propios, aun cuando hay datos anteriores.
Pont de Suert.	Ribagorzana.	Tenemos datos propios a partir de marzo de 1947, aun cuando hay aforos desde octubre de 1945. La mira utilizada en dicha estación fué instalada hace tiempo por «Catalana», pero actualmente no se realizan otras observaciones que las de nuestra empresa.
Sopeira.	Ribagorzana.	Desde marzo de 1945.
Pont de Montañana.	Ribagorzana.	Desde el año 1912.
La Piñana en Santa Ana.	Ribagorzana.	Desde junio de 1945.

El emplazamiento de dichas estaciones viene señalado en el plano general de la cuenca que se adjunta.

Puede observarse que de todas las estaciones citadas es la establecida en Pont de Montañana la que ofrece un período de toma de datos más extenso, y se dispone de los caudales diarios desde enero de 1912 hasta la fecha, salvo pequeñas lagunas. En los cuadros adjuntos se indican los caudales medios mensuales y las aportaciones de esta estación, mes por mes, desde agosto de 1912 hasta la actualidad. Siguen, en cuanto a número de datos, las antiguas estaciones por vertedero establecidas en los ríos Tor y San Nicolau, antes de su confluencia.

Por lo que se refiere al resto de las estaciones, su instalación es relativamente reciente y comprenden, generalmente, los datos desde mediados del año 1945.

Los datos de la estación de Santa Ana resultan discrepantes en relación con los obtenidos en las estaciones de Sopeira y Pont de Montañana, ya que, en general, pese a recoger las aguas del río Guart, afluente del Ribagorzana más abajo de Pont de Montañana, sus resultados son inferiores a los de aquellas otras estaciones.

### 3. EXAMEN DE LA VARIACIÓN DE LOS CAUDALES A LO LARGO DEL AÑO Y DIVISIÓN DEL MISMO EN PERÍODOS DE SEQUIAJE Y DESHIELO

Del análisis de los datos de aforos disponibles y, principalmente, de las curvas de caudales cronológicos —y aun cuando la variación de las aportaciones a lo largo del ciclo anual sea distinta según el año que se considere y, asimismo, según sea la altitud del punto cuyos caudales se consideren— se notan claramente dos períodos: uno de aguas bajas, que corresponde sensiblemente a los meses de agosto a abril siguiente, y otro de aguas altas, que comprende el período de 1 de mayo a 31 de julio.

En mérito a que el año, desde el punto de vista de su aplicación hidroeléctrica, realmente empieza cuando los embalses están llenos, o sea, cuando fenece el deshielo, y a que éste depende esencialmente de las precipitaciones que en forma de nieve hayan tenido lugar en el invierno o período de sequiaje de caudales que le ha precedido, aceptamos y definimos como *año hidráulico* el período comprendido entre 1 de agosto y el 31 de julio siguiente.

A la época de aguas bajas le llamamos *período de*



*sequiaje* y comprende los nueve meses que van de agosto a abril siguiente, ambos inclusive. Al resto del año le llamamos *período de deshielo*, y comprende los tres meses de mayo, junio y julio.

La variación de los caudales mensuales durante el *sequiaje* es relativamente pequeña, si bien se produce generalmente un mínimo en los meses de enero y febrero, bastante más acentuado, en las cuencas situadas a gran altura, como consecuencia de las fuertes retenciones en forma de nieve y hielo que en las mismas se producen.

Los máximos del deshielo, como sucede en todos los ríos pirenaicos, son muy acentuados. Corresponden, normalmente los tipos de caudales más altos, al mes de junio para las zonas de cabecera, y al de mayo, seguido a poca distancia del mes de junio, en las zonas media y baja del río.

Los caudales medios del período de *sequiaje* vienen a ser del orden del 0,70 del caudal medio anual, y los medios del deshielo, del orden del 1,90 del caudal medio anual.

#### 4. COMPARACIÓN ENTRE CAUDALES CORRESPONDIENTES A DISTINTOS AÑOS Y ESTABLECIMIENTO DE LA DEFINICIÓN DE ÍNDICES HIDRÁULICOS

Si en el transcurso del ciclo anual se advierte, en cierto modo, un orden, con la sucesión de los períodos de *sequiaje* y deshielo y los mínimos y máximos citados, en lo que concierne a las variaciones de un año a otro, poco es lo que se puede descubrir y prever.

Para juzgar sobre las variaciones de los ciclos que se dan anualmente, operaremos sobre lo que designamos *índices hidráulicos* que los caracterizan. Por tales entendemos los coeficientes resultantes de dividir las aportaciones que en cada caso se consideren por las medidas habidas, en análogo período, durante el mayor número de años posible. Si el período de las aportaciones corresponde al año hidráulico, el coeficiente determinará, como es lógico, el *índice hidráulico anual*; si se trata de aportaciones del período de *sequiaje* o deshielo, se obtendrá, respectivamente, el *índice hidráulico de sequiaje* o el *índice hidráulico de deshielo*, y lo mismo generalizaremos a los períodos mensuales, llamándolos entonces *índices hidráulicos mensuales*, citando en su caso el mes de que se trate.

Se comprende que los índices hidráulicos serán tanto más representativos del carácter de un período cuanto mayor sea el número de años que abarque el divisor del coeficiente. Por otra parte, se comprende que en cuencas de relativa poca extensión, como la nuestra, los fenómenos naturales que determinan la hidráulicidad deben ser comunes a toda ella, por lo que los índices hidráulicos, dentro del período que los caracteriza, han de ser sensiblemente iguales y aplicables para todos los puntos de la cuenca.

Afortunadamente, en el caso nuestro se da la circunstancia de que la estación de Pont de Montañana, bien situada, que comprende los dos tercios de la superficie de la cuenca y cuyos actuales datos comunicados coinciden extraordinariamente con los tomados directamente por nosotros, brinda datos sistemáticos de un gran número de ciclos anuales, correspondientes a 34 años completos y correlativos, desde el año 1912-13 al 1948-49, sin más excepción que la corta interrupción de los años 1937-38 a 1941-42, para los cuales se carece de información.

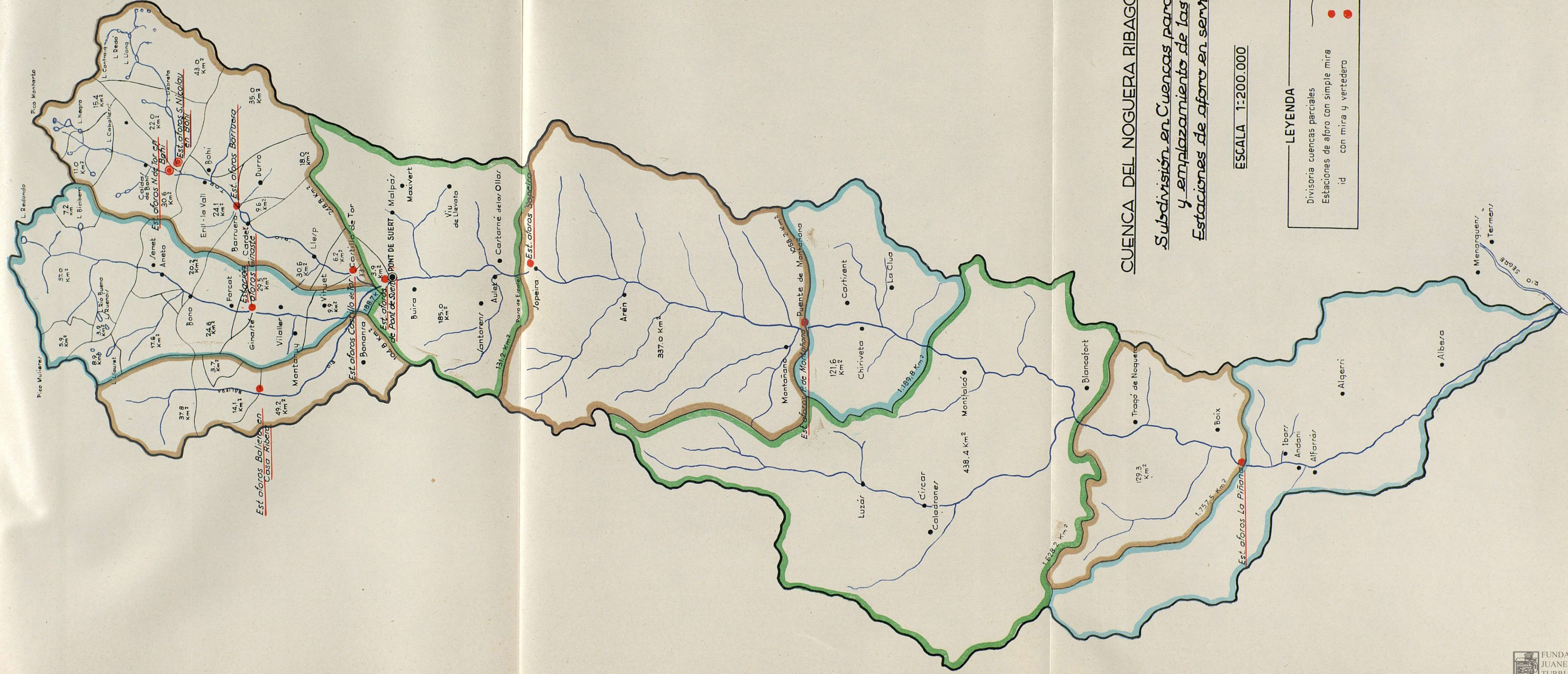
En los cuadros sobre caudales promedios y aportaciones mensuales del Ribagorzana figuran estos datos de la estación de Pont de Montañana, e incluimos en ellos los índices hidráulicos anuales y de *sequiaje* y de deshielo en todos los años, los cuales, como hemos dicho, no serán de aplicación en lo sucesivo, al igual que los mensuales, para toda la cuenca.

Incluimos también un gráfico de la variación cronológica de los índices hidráulicos anuales y de *sequiaje*, y otro de los índices hidráulicos anuales clasificados.

Después de atenta observación de los gráficos de referencia, ninguna ley se descubre. Sólo cabe apreciar que el año más húmedo de todo el período considerado tuvo un coeficiente hidráulico de 1,61, y que el año más seco sufrido ha sido con mucho el recién terminado 1948-49, con un coeficiente hidráulico verdaderamente catastrófico y excepcional de sólo 0,325, que ni tan siquiera llega a la mitad del correspondiente al año 1928-29, habitualmente tomado como patrón del año más seco con anterioridad al año 1944.

Si es cierto que no cabe deducir consecuencias en orden a la manera como se producen los años, y si también lo es que en pocos años se han dado los extremadamente secos de 1944-45 y 1948-49, no hay que creer en el polo opuesto y juzgar el porvenir por





CUENCA DEL NOGUERA RIBAGORZANA

Subdivisión en Cuencas parciales  
y emplazamiento de las  
Estaciones de aforo en servicio.

ESCALA 1:200.000

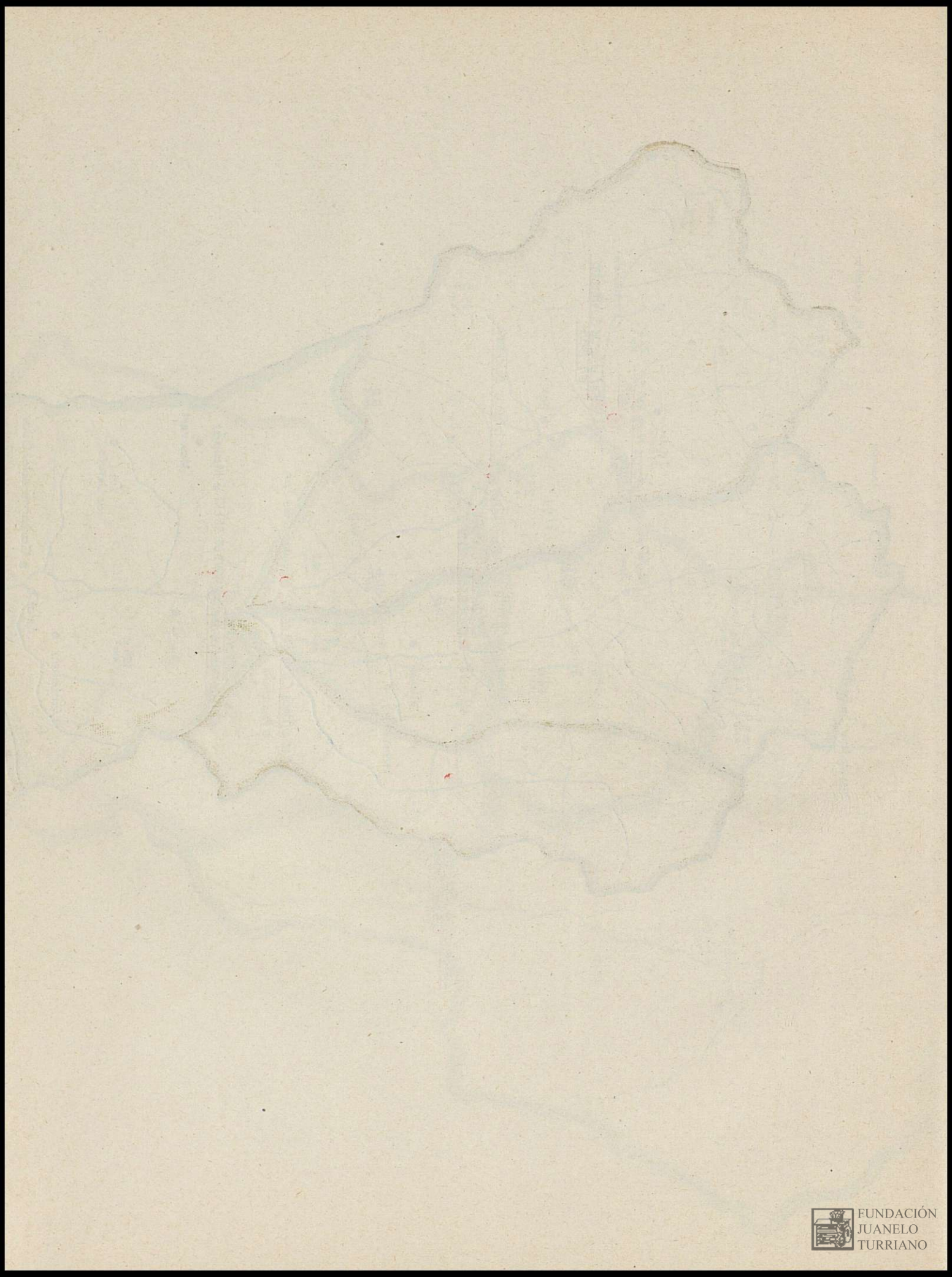
LEYENDA

Divisoria cuencas parciales

Estaciones de aforo con simple mira

id con mira y vertedero







# CAUDALES PROMEDIOS MENSUALES DEL NOGUERA RIBAGORZANA

## EN PUENTE MONTAÑANA

SUPERFICIE DE LA CUENCA AFLUENTE 1068.2 Km<sup>2</sup>

VALORES EN m<sup>3</sup>/SEGUNDO

Años	Agosto	Sepbre	Octubre	Novbre	Dicbre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Promedio sequiaje	Promedio deshielo	Promedio anual
12-13	6.693	5.970	8.748	7.027	5.094	3.432	3.861	17.413	28.193	57.339	65.303	19.455	9.678	47.171	19.128
13-14	7.342	18.310	51.468	46.073	13.581	5.729	6.493	17.322	22.743	35.606	35.037	38.716	21.078	36.468	24.957
14-15	25.697	15.483	9.954	14.733	17.890	20.077	15.085	27.900	30.830	96.958	103.812	50.687	19.783	83.602	35.869
15-16	22.477	21.917	34.477	35.440	34.994	12.722	20.396	54.567	55.733	70.014	53.303	43.319	32.612	55.590	38.388
16-17	15.922	18.983	9.029	22.997	52.568	17.022	23.075	22.984	18.406	87.568	76.333	33.174	22.348	65.576	33.244
17-18	17.726	17.966	6.552	6.103	5.497	9.500	6.346	6.284	25.546	44.316	40.093	26.693	11.277	37.001	17.761
18-19	10.858	12.183	12.848	14.730	8.542	9.439	17.071	19.081	29.523	45.022	60.606	26.306	14.853	43.798	22.149
19-20	12.535	13.496	20.577	38.537	18.039	11.629	1.538	16.842	21.790	48.722	29.853	17.845	17.889	32.165	21.478
20-21	15.548	19.296	24.429	10.273	7.222	8.032	7.882	9.726	11.043	54.174	46.873	15.739	12.625	38.842	19.233
21-22	12.135	9.083	9.216	6.756	8.642	5.213	16.336	24.048	25.760	38.990	44.450	25.010	12.975	36.060	18.794
22-23	10.135	10.850	12.510	11.680	5.271	4.309	5.568	19.206	25.813	44.135	25.540	36.400	11.724	35.465	17.708
23-24	16.806	29.896	13.593	19.110	24.564	20.064	20.210	21.503	37.323	45.316	33.476	21.310	22.513	33.366	25.241
24-25	23.277	13.746	11.568	14.543	24.177	9.087	12.568	10.277	24.827	33.110	36.273	24.829	16.577	31.351	20.301
25-26	10.271	13.717	13.964	22.893	18.493	10.716	29.921	24.416	28.397	54.980	49.856	29.439	14.054	44.704	25.519
26-27	16.764	19.980	31.677	45.977	24.535	9.142	7.253	19.210	24.760	53.719	44.313	22.896	22.219	40.265	26.769
27-28	15.771	16.327	11.503	24.260	26.583	11.313	8.824	28.245	45.833	36.016	49.800	22.458	20.965	35.943	24.730
28-29	10.884	11.070	11.100	14.093	9.635	6.581	6.943	7.203	9.266	33.158	53.143	18.306	9.651	34.671	15.958
29-30	8.632	9.673	17.132	9.553	12.123	14.910	14.150	41.606	34.573	57.551	85.447	53.090	13.083	65.145	29.945
30-31	27.006	23.210	18.561	14.380	25.713	10.971	6.578	30.152	30.906	38.455	60.926	13.439	20.966	37.353	25.096
31-32	7.690	10.607	15.390	22.646	11.072	4.951	4.551	20.281	20.446	44.726	56.363	80.203	13.080	60.475	24.993
32-33	23.448	16.730	19.052	11.706	24.177	10.106	12.421	21.084	19.370	39.161	16.310	16.852	17.641	24.192	19.292
33-34	6.845	13.606	21.164	13.050	11.674	8.429	6.936	11.397	37.463	48.693	38.390	15.335	14.515	34.094	19.450
34-35	14.345	13.523	12.148	26.016	21.042	9.113	10.636	26.368	20.900	42.990	54.250	34.778	17.159	43.895	23.898
35-36	13.771	16.800	13.090	14.896	24.071	47.897	49.124	32.145	60.997	46.052	92.453	48.768	30.166	62.098	38.193
36-37	19.190	15.030	15.003	10.230	7.210	12.216	26.489	41.036	38.913	34.909	44.733	22.542	20.517	33.946	23.902
40-41	16.823	12.170	29.016	16.987	13.339	17.639	28.932	33.539	26.430	39.281	65.360	43.100	21.607	49.072	28.530
41-42	21.913	27.173	12.874	25.877	11.948	6.419	5.614	9.996	50.737	52.100	28.040	11.684	19.152	30.636	22.047
42-43	11.542	12.947	31.039	27.683	11.510	13.913	11.479	23.319	45.423	63.119	31.560	21.597	21.004	38.837	25.499
Prom. años 1912-13 al 1942-43	15.073	15.705	17.774	19.777	17.108	11.824	14.151	22.755	30.427	49.509	50.782	29.785	18.203	43.278	24.591
43-44	14.406	26.280	33.203	31.263	10.139	5.419	5.072	13.951	14.166	47.809	20.620	9.913	17.113	26.173	19.391
44-45	15.484	9.503	6.045	7.390	6.064	5.545	6.735	8.484	17.250	15.119	14.956	7.045	9.169	12.346	9.970
45-46	9.732	6.903	5.387	6.366	12.593	7.855	7.043	7.839	64.636	105.661	64.706	27.358	14.212	65.922	27.246
46-47	13.913	18.663	10.526	6.546	6.955	6.174	22.054	58.103	51.407	81.371	43.763	22.539	21.545	49.283	28.536
47-48	10.248	7.320	14.860	10.930	7.977	14.064	14.152	19.655	29.007	38.400	34.270	12.235	14.230	28.237	17.751
Prom. años 1912-13 al 1947-48	14.722	15.407	17.203	18.674	15.840	11.216	13.579	22.581	31.164	50.746	48.492	27.669	17.820	42.235	23.970
48-49	7.839	8.227	5.665	4.603	5.997	4.112	3.271	5.538	10.647	11.961	15.967	9.458	6.226	12.424	7.788
49-50	8.290	17.637	12.439												



# APORTACIONES MENSUALES DEL RIBAGORZANA AFORADAS EN PONT-DE-MONTAÑANA

Superficie cuenca afluente 1068,2 Km<sup>2</sup>

Valores en miles de m<sup>3</sup>

AÑOS	AGOSTO	SEPTBRE	OCTUBRE	NOVBRE	DICBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	T O T A L E S			INDICES HIDRAULICOS. BASE PROMEDIO APORTACIONES 1912-13 a 1947-48.		
													9 meses sequiaje	3 meses deshielo	TOTAL	9 meses sequiaje	3 meses deshielo	Total año hidraul.
1912-13	17.928	15.474	23.432	18.213	13.643	10.532	9.340	46.639	73.077	153.576	169.266	52.108	228.278	374.950	603.228	0.542	1.117	0.798
1913-14	19.665	47.460	137.851	119.422	36.374	15.345	15.708	46.397	58.951	95.368	90.815	103.697	497.173	289.880	787.053	1.182	0.863	1.041
1914-15	68.826	40.133	26.663	38.189	47.917	53.775	36.495	74.727	79.911	259.692	269.080	135.760	466.636	664.532	1.131.168	1.109	1.979	1.495
1915-16	60.204	56.808	92.343	93.156	93.727	34.076	51.106	146.154	144.461	187.687	138.162	116.026	772.035	441.815	1.213.910	1.835	1.316	1.605
1916-17	42.647	49.205	24.183	59.607	140.797	45.593	55.823	61.560	47.710	234.541	197.856	88.854	521.125	52.251	1.048.376	1.253	1.553	1.386
1917-18	47.476	46.570	17.548	15.820	14.723	25.445	15.353	16.831	66.216	118.696	103.922	71.496	265.982	294.114	560.096	0.632	0.876	0.740
1918-19	29.082	31.579	34.413	38.180	22.879	25.281	41.299	51.106	76.524	120.588	157.092	70.459	350.343	348.139	698.482	0.833	1.037	0.923
1919-20	33.575	34.983	55.115	99.887	48.315	31.147	18.887	45.109	56.480	130.499	77.380	47.796	423.498	255.675	679.173	1.007	0.762	0.898
1920-21	41.645	50.017	65.431	26.628	18.809	21.514	19.068	26.050	28.624	145.100	121.496	42.155	297.786	308.751	606.537	0.708	0.920	0.802
1921-22	32.504	23.544	24.684	17.513	23.147	13.962	39.519	64.411	66.770	104.432	115.214	66.986	306.054	286.632	592.686	0.727	0.854	0.784
1922-23	27.147	28.123	33.506	30.275	14.118	11.543	13.470	51.443	66.908	118.212	66.200	97.494	276.533	281.906	558.439	0.657	0.840	0.738
1923-24	45.014	77.492	36.409	49.533	65.794	53.741	50.639	57.594	96.742	121.375	86.772	57.076	532.958	265.223	798.181	1.267	0.790	1.055
1924-25	62.346	35.631	30.983	50.656	64.757	24.339	30.404	27.527	64.351	88.681	94.020	66.502	390.994	249.203	640.197	0.929	0.742	0.846
1925-26	27.510	35.554	37.403	59.340	49.533	28.702	72.386	65.396	73.604	147.269	129.228	78.849	449.428	355.346	804.774	1.068	1.058	1.064
1926-27	44.902 <sup>(1)</sup>	51.788	84.845	119.172	65.716	24.486	17.548	51.451	64.178	143.873	114.860	61.327	524.086	320.060	844.146	1.246	0.953	1.116
1927-28	42.241	42.319	30.810	62.882	71.202	30.300	22.110	75.652	118.800	96.466	129.082	60.152	496.316	285.700	782.016	1.180	0.851	1.034
1928-29	29.151	28.693	29.730	36.530	25.808	17.626	16.796	19.293	24.019	88.811	137.748	49.032	227.646	275.591	503.237	0.541	0.821	0.665
1929-30	23.121	25.073	45.887	24.762	32.469	39.934	34.232	111.439	89.614	154.146	221.478	142.197	426.531	517.821	944.352	1.014	1.542	1.248
1930-31	72.333	60.160	49.715	37.273	68.869	29.385	15.915	80.758	80.110	102.997	157.922	35.994	494.518	296.913	791.431	1.175	0.884	1.046
1931-32	20.598	27.492	41.221	58.700	29.655	13.260	11.405	54.320	52.998	119.794	146.094	214.816	309.649	480.704	790.353	0.736	1.432	1.045
1932-33	62.804	43.364	51.028	30.344	64.757	27.078	30.050	56.471	50.207	104.890	42.275	45.135	416.103	192.300	608.403	0.989	0.573	0.804
1933-34	18.334	35.268	56.687	33.826	31.268	22.576	16.779	30.525	97.105	130.421	99.507	41.075	342.368	271.003	613.371	0.814	0.807	0.811
1934-35	38.422	35.052	32.540	67.435	56.359	24.408	25.730	70.623	54.173	115.145	140.616	93.148	404.742	348.909	753.651	0.962	1.039	0.996
1935-36	36.884	43.546	35.061	38.612	64.472	128.287	123.085	86.098	158.103	123.345	239.639	130.620	714.148	493.604	1.207.752	1.697	1.470	1.597
1936-37	51.399	38.958	40.185	26.516	19.310	32.720	64.083	109.909	100.863	93.502	115.949	60.376	483.943	269.827	753.770	1.150	0.804	0.996
1940-41	45.058	31.545	77.717	44.029	35.726	47.244	69.993	89.830	68.506	105.209	169.413	115.439	509.648	390.061	899.709	1.211	1.162	1.189
1941-42	58.692	70.433	34.482	67.072	32.003	17.194	13.582	26.775	131.509	139.545	72.680	31.294	451.742	243.519	695.261	1.074	0.725	0.919
1942-43	30.914	33.558	83.134	71.755	30.828	37.264	27.769	62.459	117.737	169.059	81.804	57.845	495.418	308.708	804.126	1.178	0.920	1.063
Prom. años 1912-13 al 42-43	40.372	40.708	47.607	51.262	45.821	31.670	34.235	60.948	78.866	132.604	131.628	79.775	431.489	344.007	775.496			
%	5.21	5.25	6.14	6.61	5.91	4.08	4.41	7.86	10.17	17.10	16.97	10.29	55.64	44.36	100%			
1943-44	38.586	68.118	88.931	81.035	27.156	14.515	12.709	37.368	36.720	128.053	53.447	26.551	405.138	208.051	613.189	0.963	0.620	0.811
1944-45	41.472	24.633	16.191	19.155	16.243	14.852	16.295	22.723	44.712	40.496	38.768	18.870	216.276	98.134	314.410	0.514	0.292	0.416
1945-46	26.067	17.893	14.429	16.502	33.731	21.038	17.038	20.995	167.538	283.003	167.720	73.276	335.231	523.999	859.230	0.797	1.561	1.136
1946-47	37.264	48.375	28.192	16.969	18.628	16.537	53.352	155.624	133.246	217.944	113.435	60.368	508.187	391.747	899.934	1.208	1.167	1.190
1947-48	27.449	18.973	39.801	28.331	21.367	37.670	35.459	52.644	75.185	102.851	88.828	32.772	336.879	224.451	561.330	0.801	0.669	0.742
Prom. años 1912-13 al 47-48	39.432	39.934	46.077	48.404	42.427	30.041	33.134	60.482	80.777	135.917	125.690	74.108	420.708	335.715	756.423			
%	5.21	5.27	6.09	6.40	5.61	3.97	4.38	8.00	10.68	17.97	16.62	9.80	55.62	44.38	100%			
1948-49	20.995	21.324	15.172	11.932	16.062	11.016	7.914	14.834	27.596	32.037	41.386	25.332	146.845	98.755	245.600	0.349	0.294	0.325
1949-50	22.205	45.714	33.316															

Nota: 1) Las aportaciones de Agosto de 1926 resultan de 25.237.000 m<sup>3</sup> (caudal medio de 9.423 m<sup>3</sup>/seg) si nos basamos en los datos de caudales diarios de que se dispone, pero por encontrar estos demasiado bajos en comparación con los correspondientes de los ríos Tor + S. Nicolau, se han sustituido por otros valores deducidos de una curva trazada a base de relacionar los caudales diarios de aquellos ríos con los del Noguera Ribagorzana en Pont de Montañana, de todos los meses de Agosto de que se tienen datos, obteniéndose un caudal promedio de 16.764 m<sup>3</sup>/s del que resulta el valor indicado en el cuadro.







lo que ha sucedido en este último año. No hay motivo alguno para sentirse alarmados, pues al comprobar que no existe o no se descubre ley alguna de la variación hidráulica interanual, queda implícitamente reconocido que de la misma manera que en el pasado se presentaron desordenadamente años buenos y años malos, en lo futuro ha de suceder lo mismo. Obsérvese, además, que si los años 1944-45 y 1948-49 fueron muy malos, en sus inmediatos figuran los años 1942-43, 1945-46 y 1946-47, con índices hidráulicos superiores a la unidad, y, naturalmente, no se puede suponer seriamente que en la actualidad hayan cambiado las circunstancias cosmológicas en forma que surja ya perpetuamente la catástrofe. Lo sensato es creer que seguirá el loco desorden interanual y que son de prever unos años excepcionales como el pasado en el montaje y en el funcionamiento de los sistemas hidroeléctricos, tal como lo hacemos nosotros y como se comprobará en el curso del presente estudio.

De la ordenación clasificada de los índices hidráulicos anuales se puede desprender una clasificación de los años según su hidraulicidad, y así convenimos en la siguiente:

Años húmedos: son aquellos con índice hidráulico superior a 1,20.

Años normales: son los de índices hidráulicos comprendidos entre 1,20 y 0,80.

Años secos: son los de índice hidráulico comprendidos entre 0,80 y 0,65.

Años extremadamente secos: son los de índice hidráulico inferior a 0,65.

En el transcurso del período observado, de acuerdo con la anterior clasificación, se han dado los siguientes:

Años húmedos ... ..	5	} Suma: 27.
Años normales ... ..	22	
Años secos ... ..	5	} Suma: 7.
Años extremadamente secos ... ..	2	
TOTAL AÑOS ... ..	34	

La suma de los años húmedos y normales —que son los de rendimiento— se hallan, por tanto, en la proporción de aproximadamente 4 a 1 en relación a los años secos o extremadamente secos, consecuencia que resulta bastante satisfactoria.

Otra observación importantísima, que se deduce de los gráficos que comentamos, es que nunca, hasta la

fecha, se han presentado dos años extremadamente secos seguidos. Los casos más desfavorables corresponden a la sucesión de los años secos (22-23 y 23-24), o de uno extremadamente seco después de otro seco (47-48 y 48-49), pero aun en estas dos únicas veces que se han dado tales casos, los índices hidráulicos de deshielo del primero de cada uno han sido, respectivamente, de 0,85 y 0,669, todos ellos relativamente aceptables, lo cual garantiza, en cierto modo, el llenado de los embalses si se hace uso de las medidas que prevemos al hablar de la determinación de las reservas y del funcionamiento de los embalses.

Los años *tipos* más resaltables han resultado ser los siguientes:

Año húmedo ... ..	1935-36 con índice hidráulico	1.597
Años medios... ..	1925-26 » » »	1.064
	1934-35 » » »	0.996
Años secos ... ..	1928-29 » » »	0.665
Año extremadamente seco...	1948-49 » » »	0.325

Por lo que respecta a los años medios, es de observar que existen otros con índices hidráulicos próximos a la unidad, pero los citados los elegimos como más normales, por cuanto los índices de sequiaje y de deshielo son también sensiblemente *uno*, circunstancia que no sucede con los otros.

## 5. FÓRMULAS GENERALES PARA EL CÁLCULO DE LOS CAUDALES

Los datos de aforos citados no son suficientes para obtener directamente de ellos y de una forma general los recursos hidráulicos aprovechables en cualquier punto de la cuenca. Resulta, en efecto:

- 1.º Que el punto de emplazamiento de las estaciones de aforos no coincide, en general, con los tramos de río adecuados para establecer las tomas de los aprovechamientos hidroeléctricos a prever.
- 2.º Que en los datos de aforos de que se dispone no quedan comprendidos de una forma completa para toda la cuenca los años hidráulicos que interesa adoptar como característicos o «tipos».
- 3.º Que la utilización de dichos datos ha de ir precedida de una comparación entre ellos, a fin de comprobar su exactitud y permitir su eventual corrección.



Por ello se ha considerado interesante estudiar el régimen del río y sus afluentes de una forma general, tomando como base los datos de aforos antes citados, después de someterlos a las necesarias rectificaciones y determinando, finalmente, las distintas variables que podían hacerse intervenir con vistas a la obtención de los recursos hidráulicos que nos ocupan.

De una atenta reflexión sobre la manera de producirse los caudales, se infiere que los mismos dependen de las tres circunstancias siguientes:

- a) Situación de la cuenca afluente, dentro de la total.
- b) Superficie de la cuenca afluente.
- c) Índice de hidraulicidad del período de que se trate.

Por lo que afecta a la primera condición, la experiencia indica que las cantidades de precipitaciones son tanto mayores cuanto mayor es la altitud de la cuenca, lo que se explica por las barreras que suponen las cumbres de la Cordillera Pirenaica, las cuales obligan a que las masas de aire que tropiezan con ellas deban ascender por encima de sus cotas, produciéndose la condensación en forma de nube y en su caso de lluvia o nieve. Por otra parte se produce, además, en nuestro caso (como puede observarse en el corte geológico que se une a este estudio), el hecho de que cuanto más elevada se halla la cuenca, más impermeables y menos absorbentes son los terrenos geológicos, por tratarse de granitos o terrenos paleozoicos.

Como consecuencia de la coincidencia de los factores de pluviometría y escorrentía, es natural que la cantidad de aportaciones, por unidad de superficie de cuenca, ha de venir expresada en función de la altitud media de la cuenca del punto cuya determinación de caudales interese.

A los caudales, expresados en litros segundo, y por km. cuadrado de cuenca correspondientes a un período y año cualquiera, les llamaremos en lo sucesivo *caudales específicos*, designándolos por la letra  $k$  y, a los mismos correspondientes al *año medio teórico* los llamaremos *caudales modulares*, designándolos con la letra  $K$ .

Por lo que concierne a la segunda condición, es decir a la de superficie de la cuenca, la cosa no ofrece dudas; a igualdad de las otras condiciones, cuanto

más superficie, mayores aportaciones hidráulicas se han de dar.

Finalmente, por lo que respecta a la tercera condición, ha de admitirse que los caudales medios y aportaciones correspondientes a un año determinado, o, para mayor generalización, a un determinado período (sea de sequiaje, de deshielo, o mensual), han de venir expresados por el producto de los correspondientes al mismo punto para el año medio teórico multiplicado por el índice hidráulico del período de que se trate, a base de considerar, tal como se ha dicho en el apartado anterior de este Capítulo, que los índices de hidraulicidad de la cuenca quedan determinados por los datos de la estación de Pont de Montañana, en razón, como también se ha expuesto, a que los fenómenos que producen la hidraulicidad, en determinado período, son sensiblemente los mismos a todo lo largo de la cuenca.

En consecuencia, llamando  $Q$  al caudal, expresado en m.<sup>3</sup>/seg., en un punto cualquiera y correspondiente a un período determinado cualquiera —año, sequiaje, deshielo o mes— y designando el índice hidráulico correspondiente por la letra  $i$ , aquél vendrá determinado por la fórmula siguiente:

$$Q = \frac{k}{1.000} S \cdot i \quad (1)$$

## 6. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES CONTENIDAS EN LA FÓRMULA GENERAL ANTERIOR

La variable  $S$  (superficie de cuenca), es en cada caso constante y perfectamente determinable. La variable  $i$ , como se ha dicho, también es implícitamente conocida por los datos de la estación de Pont de Montañana y se halla concretamente expuesta, en los cuadros que se acompañan, en cuanto afecta a los períodos anuales de sequiaje y de deshielo de todos los años, y asimismo, a los meses de los años que nos interesan más específicamente.

Vamos, ahora, a determinar la variable  $K$ , o sea, lo que hemos quedado en llamar los caudales modulares de la cuenca.

De la fórmula (1) se deduce su valor genérico:

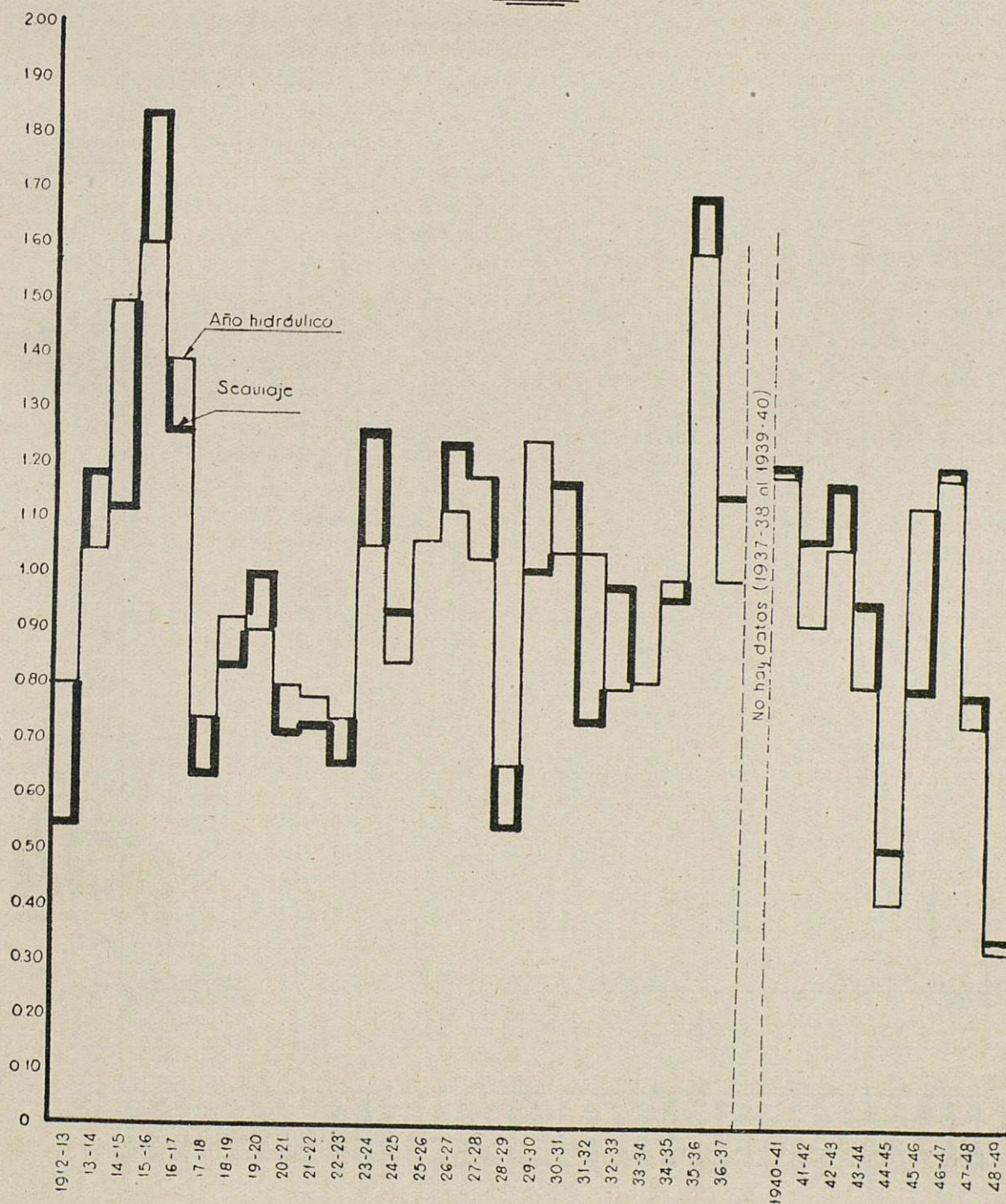
$$K = \frac{Q}{S \cdot i} \cdot 1.000 \quad (2)$$



# INDICES HIDRAULICOS

COMPARATIVOS DE LAS APORTACIONES DEL NOGUEDA DIBAGORZANA  
EN PUENTE MONTAÑANA, CORRESPONDIENTES A LOS SEQUIAJES Y AÑOS  
HIDRAULICOS DESDE 1912-13

Se ha tomado como base 1.00 el promedio de las aportaciones habidas durante el período  
del 1912-13 al 1947-48. Aportación anual media del período 1912-13 al 1947-48: 756,423,000m<sup>3</sup>









# INDICES HIDRAULICOS CLASIFICADOS EN ORDEN DECRECIENTE

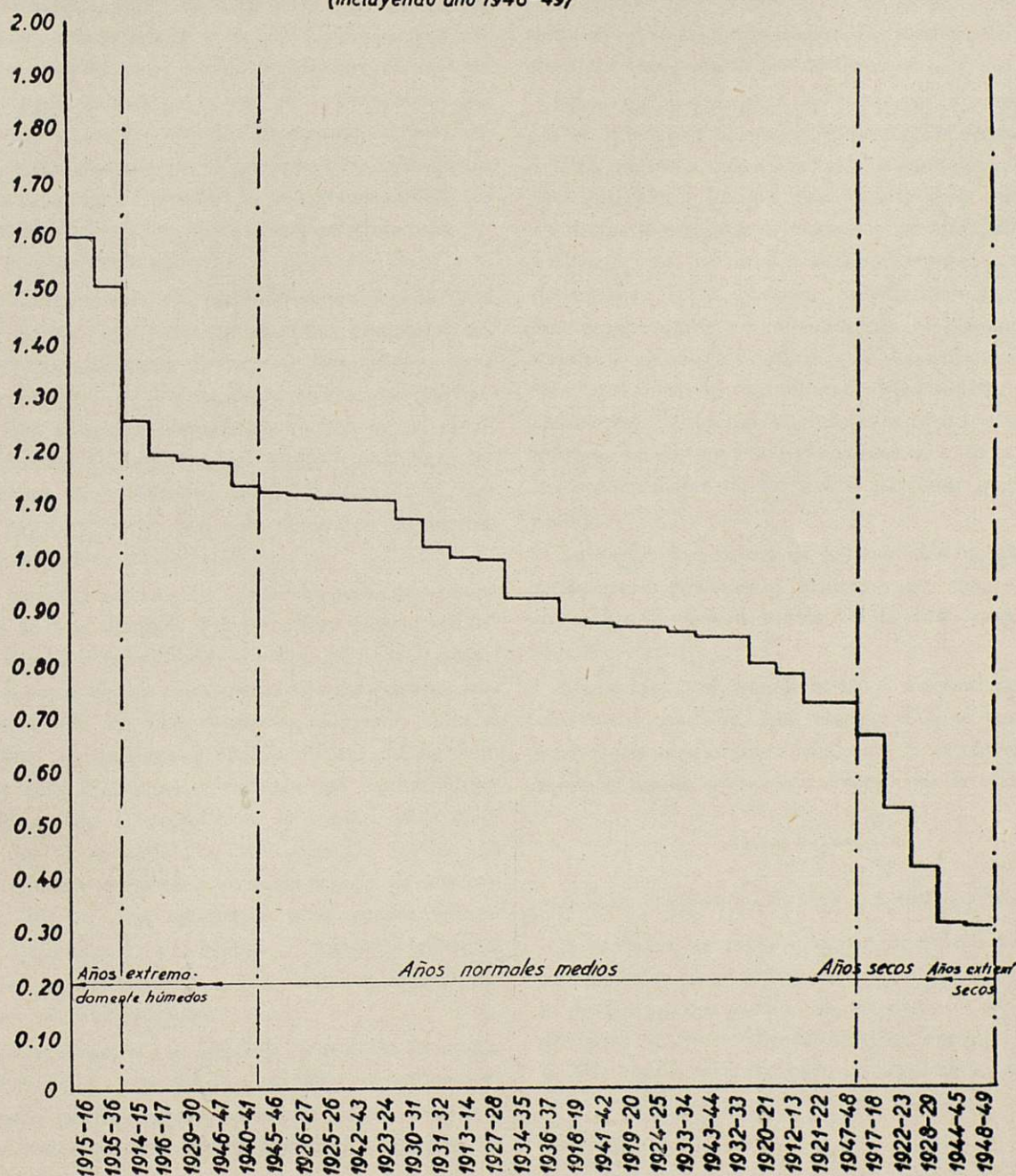
En 34 años se han presentado

5 extremadamente húmedos

22 medios

5 secos

2 extremadamente secos  
(incluyendo año 1948-49)









Por tanto, no hay más que dividir los caudales en litros segundo que se conozcan —anuales, de sequiaje, de deshielo, mensuales— por los índices hidráulicos respectivos multiplicados por las superficies de cuenca, para tener el caudal específico de las mismas.

Si tal se hiciera con todos los datos conocidos de todas las estaciones de aforo de que disponemos, para cada punto de la cuenca, teóricamente debía obtenerse la absoluta coincidencia en los resultados; pero, como quiera que los aforos no siempre son exactos y, por consecuencia, tampoco lo pueden ser los índices hidráulicos, nos vamos a valer de las ideas que venimos exponiendo para rectificar los errores que se hubieran presentado y, a la vez, para generalizar los puntos observados a todos los de la cuenca, ello, en forma tal, que después de concluido el trabajo, justamente por la concatenación de las correcciones, los *datos calculados* nos han de merecer muchas más garantías que los *datos aforados*.

Como no es posible abarcar todo el período de 1932 a 1949, porque sólo tenemos los datos completos del mismo correspondientes a Pont de Mantañana, para la determinación de los caudales modulares partiremos de los años más completos, lo que ha de resultar suficiente. Tomamos a tal efecto como base los datos de los años 1945-46, 46-47, 47-48 y 48-49, los cuales, por otra parte, han sido obtenidos, en su mayoría por nuestra empresa.

Para las correcciones de que se ha hablado, hemos operado en dos tiempos. Primeramente hemos indicado los caudales específicos en unos gráficos mensuales, en función de las cotas medias de las cuencas respectivas, y una vez ello efectuado, debiendo hallarse los puntos representativos unidos en una forma suavemente continua, por las razones que hemos aducido al hablar de la «condición de lugar», para cada mes y dentro de cada año, trazamos las curvas que mayor número de puntos comprenden, o se acercan a ellos, con lo cual obtenemos unas curvas enteramente racionales y que vienen a eliminar los fenómenos circunstanciales y a rectificar los errores habidos en las observaciones.

Pasamos, después, al segundo tiempo de la operación. Para ello, cogemos los caudales específicos, ya corregidos por las curvas obtenidas anteriormente, y los dividimos por los índices hidráulicos (*i*) de los

períodos correspondientes, con lo que queda ya aplicada íntegramente la fórmula (2) y determinados, por consiguiente, los *caudales modulares*, pero todavía sin ser acabados de corregir.

Estos últimos valores que, como se ha dicho, deberían ser exactamente iguales para cada estación en cada uno de los períodos considerados, se resumen en el cuadro sobre caudales modulares, con el fin de eliminar los errores que puedan existir en los valores de los índices hidráulicos considerados (relativamente pequeños, habida cuenta de la similitud de los resultados) y se deducen los valores medios, después de eliminar los número anormales.

Estos últimos valores se traspasan a unos gráficos en que figuran como ordenadas las altitudes medias en metros y como abscisas los caudales modulares en l./seg./Km.<sup>2</sup>, lo que nos permite unir por curvas continuas los diferentes valores obtenidos. Ello se ha realizado mes por mes y se ha observado que no se presentaban saltos bruscos. Se adjuntan aquí únicamente las curvas correspondientes al período de sequiaje y al año hidráulico, que determinan las leyes más probables de variación de los caudales modulares —por definición correspondiente al año medio teórico— a lo largo de toda la cuenca y en función de las cotas medias de las zonas parciales que se consideran.

La variación relativa de los caudales medios o bien modulares mensuales a lo largo del año, es distinta según la *altitud media* de la zona que se considere.

Llamando *q* al caudal relativo mensual dentro del año medio, es decir, a la relación entre el caudal mensual (bien medio, bien modular) y el caudal medio modular anual, *q* se puede obtener por la relación:

$$q_m = \frac{K_m}{K} = \frac{Q_m}{Q^o}$$

(siendo *Q<sup>o</sup>* el caudal medio anual del año medio teórico).

Estudiadas las zonas que por su altitud pueden ser consideradas como semejantes por agrupación y cálculo de los valores medios de los distintos *q*, se obtienen para el año medio teórico las leyes que acusa el gráfico que se adjunta, para las siguientes zonas:

A) Zona superior a la cota media de cuenca de 2.250 m.



- B) Zona comprendida entre 2.100 y 2.250 m.
- C) Zona comprendida entre 1.550 y 2.100 m.
- D) Zona comprendida entre 1.650 y 1.930 m.
- E) Zona inferior a 1.650 m. de cota media

#### 7. ELECCIÓN DE LOS AÑOS QUE SE HAN DE CONSIDERAR EN ESTE ESTUDIO

Después de lo expuesto se comprende que para determinar un caudal cualquiera para un punto cualquiera de la cuenca, no hay más que aplicar la fórmula general (1) haciendo uso de los valores, que corresponde aplicar a las variables, de acuerdo con los estados y gráficos que las representen.

Es de advertir, sin embargo, que el resultado se acercará tanto más a la realidad cuanto los índices hidráulicos se acercan más a la unidad.

Ahora bien, en los cálculos de las producciones, potencias, clasificación de la energía, etc., etc., que han de seguir en otros capítulos de este estudio, hemos de referirnos a años tipos, por lo que interesa, desde ahora, señalarlos.

Por lo que respecta al año medio, sin vacilación adoptamos el llamado «medio teórico».

Como año extremadamente seco, adoptamos el más bajo de todos los presentados, o sea, el año 1948-49, y como se da la circunstancia de que para tal año poseemos los datos de todas las estaciones, adoptaremos, para la obtención de los caudales en los distintos puntos de la cuenca, los caudales específicos correspondientes a dicho año, convenientemente multiplicados por las respectivas superficies de la cuenca.

Habida cuenta de que, por parte de las compañías particulares de electricidad más importantes, de Cataluña, se venía tomando como año típicamente seco, antes de las sequías extraordinarias más recientes, el de 1928-29, es de interés, también, adoptar dicho patrón, para los efectos de las debidas comparaciones. Los valores de dicho año serán los que se deduzcan de las fórmulas generales antes expuestas.

#### 8. CLASIFICACIÓN Y UTILIZACIÓN DE LOS RECURSOS.

En los volúmenes circulados por un punto del río, cabe establecer ciertas distinciones.

Existen, por una parte, aquellos caudales de volumen muy reducido que puede considerarse que, con gran probabilidad, no serán nunca más exigüos, ya

que son los menores que se han presentado en los años de los que se tiene experiencia.

El aprovechamiento de estos caudales está, pues, asegurado constantemente a lo largo del año y por seco que éste sea. A los recursos correspondientes a estos caudales mínimos los denominaremos *recursos permanentes*.

En contraste, existen aquellos otros caudales de época de deshielo o de grandes avenidas que no son utilizables en su totalidad en *saltos de caudal fluyente*, ya que su aprovechamiento íntegro por una instalación hidroeléctrica de esta clase exigiría prever una capacidad de canal y equipos que únicamente ofrecerían una máxima utilización durante reducidas épocas del año y, por tanto, resultaría antieconómico el proyectarlos de esta forma.

A los recursos hidráulicos por encima de la capacidad de absorción de los aprovechamientos, se los denomina *recursos sobrantes*.

Finalmente, los caudales intermedios entre ambos ofrecen características muy variables e imprevisibles y constituyen lo que llamamos *recursos eventuales*.

De los tanteos efectuados para determinar el tope máximo económico de los caudales que se han de aprovechar en los saltos de caudal fluyente, se ha llegado a la conclusión de que, salvo circunstancias especiales, no conviene superar el límite de 1,10 del caudal medio del año teórico, en razón a que el exceso tiene poca duración y es de escaso valor.

Hay que añadir que en los caudales medios mensuales se producen en determinados días, como consecuencia de precipitaciones y avenidas extraordinarias, caudales superiores a los del expresado tope y, naturalmente, si queremos ser justos en los cálculos de los *recursos utilizables* en los saltos de *caudal no regularizado* hay que proceder a la deducción mensual de los excesos diarios por encima del límite aceptado. Para determinar, en forma aproximada, cuáles pueden ser estos recursos utilizables, se han determinado los porcentajes útiles de los caudales similares dados en las estaciones de Pont de Montañana y de Bohí en los meses de los tres años tipo adoptados, cuyos coeficientes, se aplican, a estos efectos, tanto a los caudales medios de dichas estaciones como a los puntos de la cuenca que por su semejanza pueden serles homologados.



# CAUDALES MODULARES CALCULADOS PARA AÑO MEDIO TEÓRICO

(En l/seg./Km<sup>2</sup>)

	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	SEQUIA JE	MAYO	JUN.	JUL.	DES- HIELO	TOTAL AÑO
1945-46 <b>TOR EN BOHI</b> S = 57 Km <sup>2</sup> Hm = 2310 m.			34.2	45.4	27.0	17.7	18.5	36.8	38.1			84.1	68.3		
46-47	40.8	38.9	36.8	46.8	25.1	19.2	12.9	14.7	36.6		80.9	110.2	76.1		
47-48	39.0	41.9	33.1	37.9	25.2	12.7	13.8	25.9	37.8		103.7	118.2	90.5		
48-49	43.0	40.8	32.5	38.9	23.8	17.4	20.5	42.4	91.5		119.5	132.5			
<b>PROMEDIO</b>	<b>40.9</b>	<b>40.9</b>	<b>34.2</b>	<b>42.3</b>	<b>25.3</b>	<b>16.8</b>	<b>16.4</b>	<b>25.8</b>	<b>37.5</b>	<b>31.2</b>	<b>92.3</b>	<b>104.2</b>	<b>78.3</b>	<b>91.5</b>	<b>46.4</b>
1945-46 <b>S. NICOLAU</b> S = 65 Km <sup>2</sup> Hm = 2275 m.			32.6	44.0	26.8	17.5	18.5	35.6	37.4			81.2	65.3		
46-47	38.7	37.6	35.3	45.8	25.1	19.0	12.9	14.8	36.0		76.6	105.2	71.8		
47-48	37.3	39.9	32.1	36.2	25.2	12.7	13.8	25.4	37.4		98.7	111.6	83.3		
48-49	40.6	38.4	31.0	36.8	23.8	17.1	20.5	42.0	86.8		113.1	127.1			
<b>PROMEDIO</b>	<b>38.9</b>	<b>38.9</b>	<b>32.8</b>	<b>40.6</b>	<b>25.2</b>	<b>16.6</b>	<b>16.4</b>	<b>25.3</b>	<b>36.9</b>	<b>30.2</b>	<b>87.7</b>	<b>99.3</b>	<b>73.5</b>	<b>86.7</b>	<b>44.5</b>
1945-46 <b>BARRUERA</b> S = 199.1 Km <sup>2</sup> Hm = 2153 m.			26.2	38.1	26.4	17.2	18.1	31.9	35.5			71.8	55.1		
46-47	32.2	30.7	31.7	39.4	25.1	18.8	13.0	15.2	34.2		65.2	88.0	58.3		
47-48	31.4	32.0	28.6	32.1	25.0	12.7	13.7	24.3	35.6		85.4	98.1	63.5		
48-49	34.0	31.5	24.9	33.2	23.8	17.1	20.5	37.6	72.2		96.2	109.4			
<b>PROMEDIO</b>	<b>32.5</b>	<b>31.4</b>	<b>27.8</b>	<b>35.7</b>	<b>25.1</b>	<b>16.5</b>	<b>16.3</b>	<b>23.8</b>	<b>35.1</b>	<b>27.2</b>	<b>75.3</b>	<b>85.9</b>	<b>59.0</b>	<b>73.3</b>	<b>38.8</b>
1945-46 <b>CASTILLO DE TOR</b> S = 245.5 Km <sup>2</sup> Hm = 2031 m.			23.0	33.4	26.3	16.7	17.7	29.0	34.0			63.7	47.2		
46-47	27.1	26.0	28.0	34.5	24.7	18.8	13.1	15.7	32.8		58.5	74.7	49.7		
47-48	26.8	27.3	25.5	28.4	25.0	12.7	13.7	23.5	34.1		73.6	80.9	51.8		
48-49	28.5	27.2	21.9	30.9	23.6	16.6	20.5	34.3	60.5		82.2	92.7			
<b>PROMEDIO</b>	<b>27.5</b>	<b>26.8</b>	<b>24.6</b>	<b>31.8</b>	<b>24.8</b>	<b>16.2</b>	<b>16.2</b>	<b>22.7</b>	<b>33.6</b>	<b>24.9</b>	<b>66.1</b>	<b>73.1</b>	<b>49.6</b>	<b>62.8</b>	<b>34.5</b>
1945-46 <b>GINASTE</b> S = 149.3 Km <sup>2</sup> Hm = 2049 m.			23.3	34.0	25.7	16.9	17.9	29.8	34.2			64.9	48.3		
46-47	27.9	26.6	28.6	35.2	24.2	18.8	13.1	15.5	33.0		59.3	76.4	50.9		
47-48	27.8	27.9	26.1	29.1	25.0	12.7	13.5	23.6	34.3		75.4	83.3	53.2		
48-49	29.3	27.5	22.2	32.1	23.6	16.6	20.5	34.7	62.3		83.9	95.7			
<b>PROMEDIO</b>	<b>28.3</b>	<b>27.3</b>	<b>25.1</b>	<b>32.6</b>	<b>24.6</b>	<b>16.3</b>	<b>16.2</b>	<b>23.0</b>	<b>33.8</b>	<b>25.3</b>	<b>67.4</b>	<b>74.9</b>	<b>50.8</b>	<b>64.3</b>	<b>35.1</b>
1945-46 <b>BALIERA</b> S = 55.6 Km <sup>2</sup> Hm = 1970 m.			22.4	30.8	24.8	16.5	17.3	27.8	33.3			60.2	43.8		
46-47	25.0	24.1	26.0	30.8	24.2	18.5	13.2	16.0	31.9		58.5	68.7	46.0		
47-48	24.8	25.3	23.7	26.7	24.8	12.7	13.5	23.3	33.4		68.8	73.2	47.7		
48-49	26.4	25.3	21.3	28.5	22.8	16.6	20.5	32.7	55.3		76.3	84.5			
<b>PROMEDIO</b>	<b>25.4</b>	<b>24.9</b>	<b>23.4</b>	<b>29.2</b>	<b>24.2</b>	<b>16.1</b>	<b>16.1</b>	<b>22.4</b>	<b>33.0</b>	<b>23.9</b>	<b>62.3</b>	<b>67.4</b>	<b>45.8</b>	<b>58.4</b>	<b>32.6</b>
1945-46 <b>GINASTE + CASTILLO + BALIERA</b> S = 450.4 Km <sup>2</sup> Hm = 2027 m.			23.0	33.1	25.5	16.7	17.7	29.0	34.0			63.5	47.1		
46-47	27.1	26.0	27.8	34.2	24.2	18.8	13.1	15.7	32.6		58.5	74.7	49.7		
47-48	26.7	27.3	25.5	28.4	25.0	12.7	13.7	23.5	34.1		73.2	80.9	51.8		
48-49	28.5	27.2	21.9	30.9	23.3	16.6	20.5	34.3	60.2		81.8	91.8			
<b>PROMEDIO</b>	<b>27.4</b>	<b>26.8</b>	<b>24.6</b>	<b>31.6</b>	<b>24.5</b>	<b>16.2</b>	<b>16.2</b>	<b>22.7</b>	<b>33.6</b>	<b>24.9</b>	<b>65.9</b>	<b>73.0</b>	<b>49.5</b>	<b>62.7</b>	<b>34.4</b>
1945-46 <b>PONT DE SUERT</b> S = 546.2 Km <sup>2</sup> Hm = 1893.5 m.			20.8	27.9	23.1	16.0	16.7	26.4	32.5			56.3	40.2		
46-47	22.6	21.9	23.6	28.1	23.7	17.6	13.3	16.5	31.3		53.2	62.0	41.6		
47-48	22.3	23.4	22.0	24.8	24.4	12.7	13.4	22.7	32.5		63.0	65.0	43.5		
48-49	23.6	23.4	19.7	26.4	22.5	16.0	20.5	30.6	48.8		70.3	74.8			
<b>PROMEDIO</b>	<b>22.8</b>	<b>22.9</b>	<b>21.5</b>	<b>26.8</b>	<b>23.4</b>	<b>15.6</b>	<b>16.0</b>	<b>21.9</b>	<b>32.1</b>	<b>22.6</b>	<b>58.1</b>	<b>61.1</b>	<b>41.8</b>	<b>53.6</b>	<b>30.4</b>
1945-46 <b>SOPEIRA</b> S = 732.3 Km <sup>2</sup> Hm = 1750 m.			19.2	23.7	20.1	14.8	15.8	24.0	31.2			49.8	33.4		
46-47	18.7	18.5	19.5	23.4	21.0	15.4	13.0	17.8	30.3		50.3	52.0	35.0		
47-48	18.7	19.5	19.1	21.8	21.9	12.3	13.1	22.1	31.3		55.6	54.7	36.0		
48-49	19.8	20.0	18.2	22.4	21.2	14.6	19.2	26.9	39.2		59.3	61.7			
<b>PROMEDIO</b>	<b>19.1</b>	<b>19.3</b>	<b>19.0</b>	<b>22.8</b>	<b>21.1</b>	<b>14.3</b>	<b>15.3</b>	<b>21.3</b>	<b>30.9</b>	<b>20.4</b>	<b>55.1</b>	<b>52.2</b>	<b>34.8</b>	<b>46.6</b>	<b>27.2</b>
<b>PONT DE MONTAÑA</b> <b>PROMEDIOS AÑOS 1912-13 al 1947-48</b> S = 1068.2 Km <sup>2</sup> Hm = 1512 m.	13.8	14.4	16.1	17.5	14.8	10.5	12.7	21.1	29.2	16.7	47.5	45.4	25.9	39.5	22.4

(1) Valores desechados a efectos de obtención del promedio por resultar evidentemente exagerados.

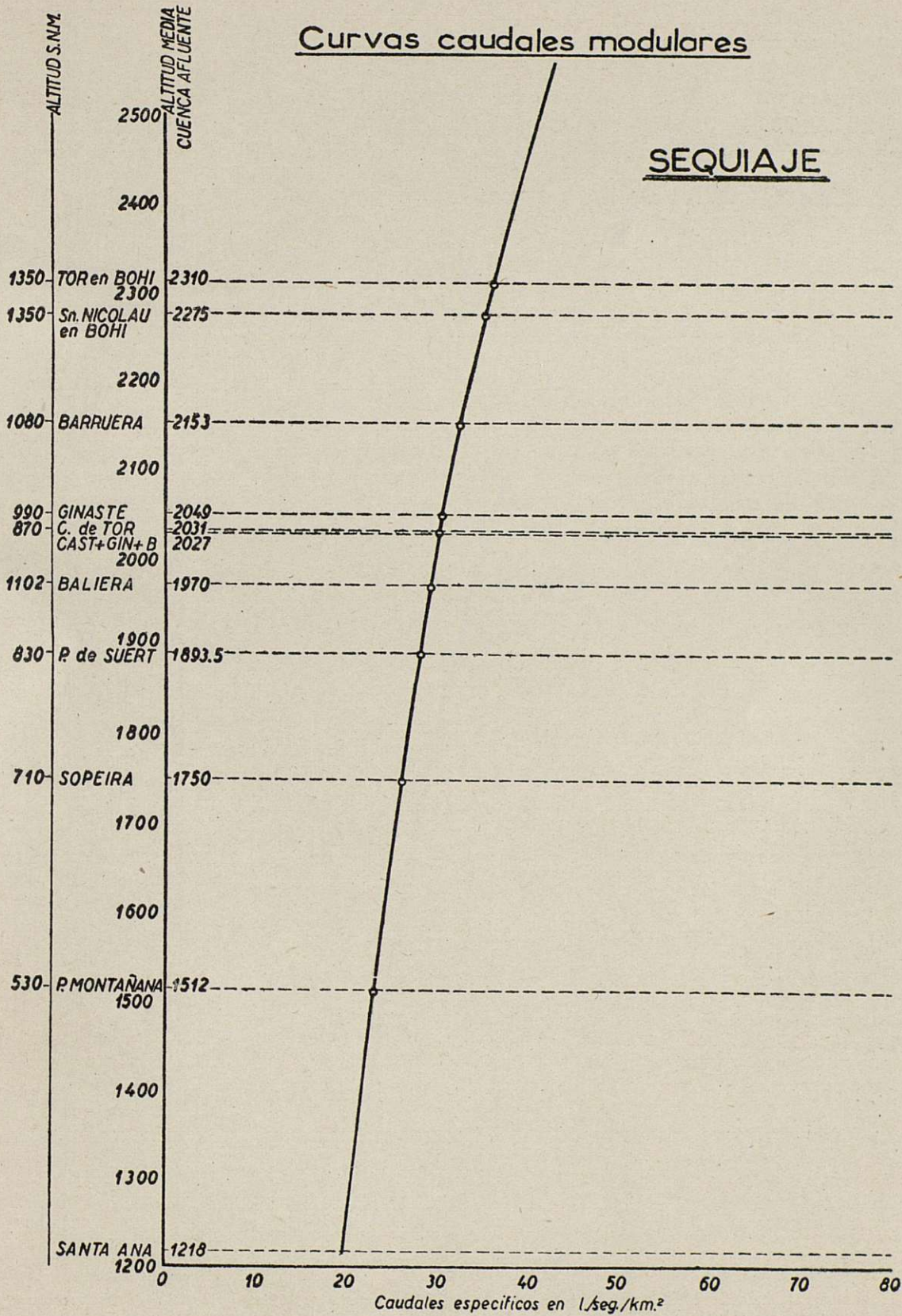






# Curvas caudales modulares

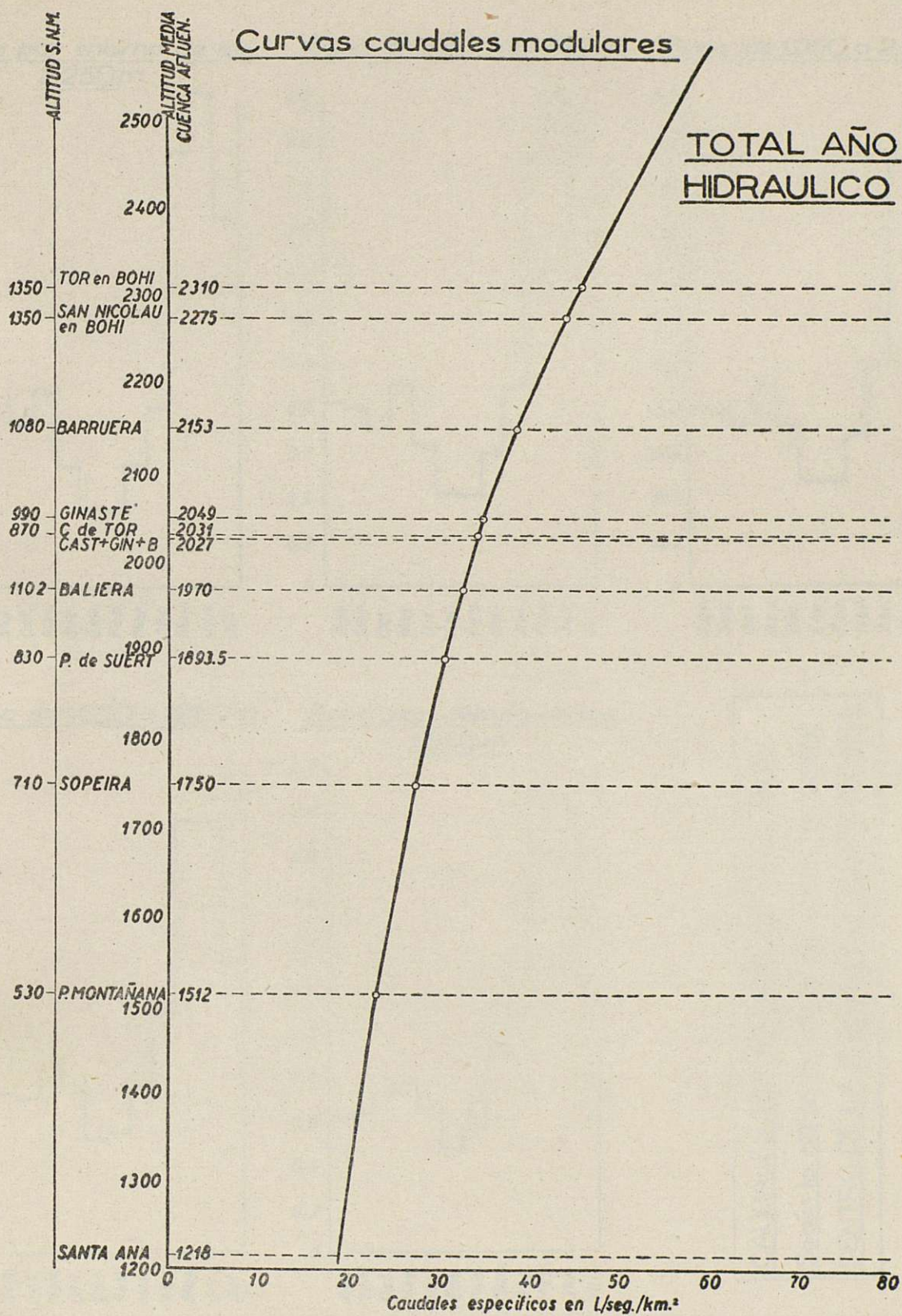
SEQUIAJE











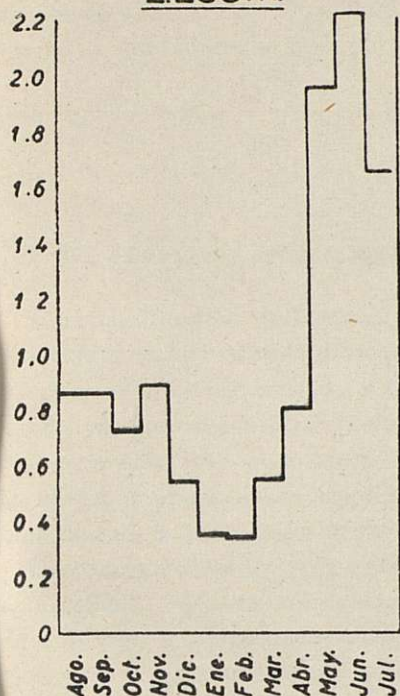


Curvas características hidráulicas

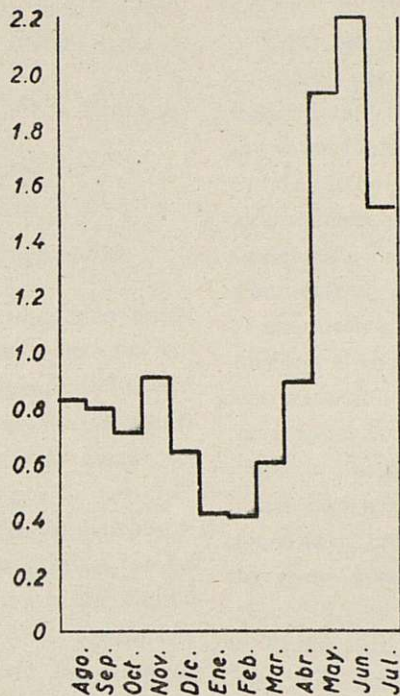
TOTAL AÑO  
HIDRÁULICO



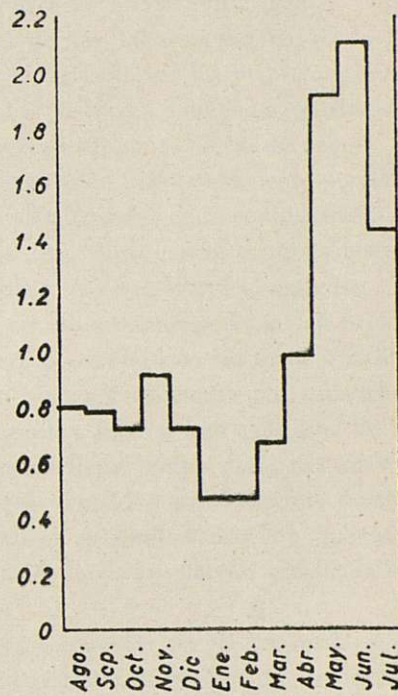
Zona por encima de los 2.250m.



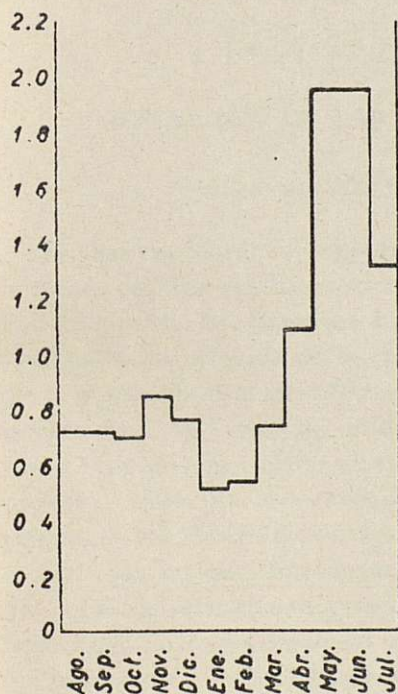
Zona de 2.100 a 2.250m.



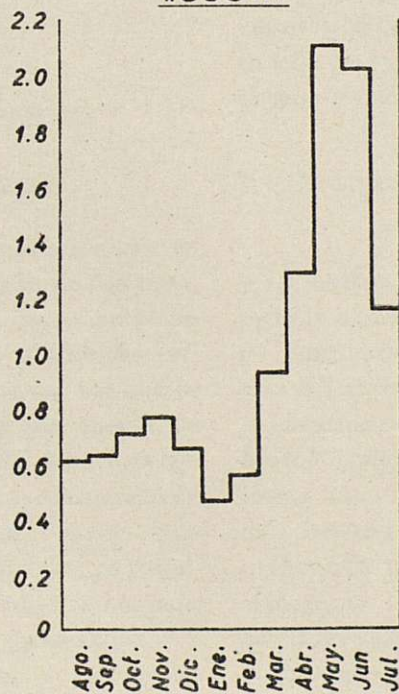
Zona de 1.950 a 2.100m.



Zona de 1.650 a 1.950m.



Zona por debajo de los 1.650m.



CAUDALES RELATIVOS MENSUALES(a)  
Según la altitud media de las zonas parciales  
DENTRO DE LA CUENCA DEL RIBAGORZANA







Para obtener los caudales absolutos sólo hace falta multiplicar los relativos por los caudales medios anuales del año medio teórico ( $Q^0$ ); para obtener las aportaciones se multiplican las áreas por el número de segundos de un mes y por  $Q^0$  y, finalmente, para determinar las producciones, se multiplicarán dichas áreas de segundos de un mes  $\frac{0,736}{360}$ , por  $Q^0$  y por la altura del salto.

## 9. CURVAS DE APORTACIONES ACUMULADAS

Si la clasificación de los recursos efectuada en el apartado anterior interesa principalmente para los saltos de caudal no regularizado, a los efectos de los embalses, en que cabe utilizar la totalidad de los recursos, es mucho más importante conocer la forma de las curvas de aportaciones acumuladas por lo que afecta al cálculo de las reservas y regímenes de consumos.

Consecuentemente se representan los gráficos de las aportaciones relativas acumuladas —para un caudal de 1 m.<sup>3</sup>/seg— correspondientes a los años, medio teórico, seco y extremadamente seco, para los casos de Bohí y de Pont de Montañana, que son los únicos precisos porque todos los lagos o embalses se hallan ubicados en zonas parejas.

## CAPÍTULO IV

### DEFINICIÓN DE LAS RESERVAS

#### 1. CONSIDERACIONES GENERALES

Las reservas hidráulicas que se prevé constituir en la cuenca del Noguera Ribagorzana serán de dos tipos. Por una parte, las formadas en los lagos naturales situados en la cabecera de la cuenca y altitudes cercanas o superiores a los 2.000 metros, en los que se incrementará la capacidad utilizable por medio de presas, que permitan elevar el nivel del lago y perforaciones o cales, para conseguir el aprovechamiento de volúmenes por debajo del nivel natural. Por otro lado existirán los embalses totalmente artificiales, conseguidos por el cierre, mediante presas, de los estrechos existentes en el río, e inundación del valle aguas arriba.

Prescindiendo de las pequeñas retenidas existentes

en toda las tomas de los saltos de caudal fluyente o del pequeño embalse del salto de Llesp, destinado sólo a la regulación diaria, todos los grandes embalses quedan situados en la zona media del Ribagorzana y entre Pont de Suert y el estrecho de Santa Ana.

Tanto en el caso de los lagos como en el de los embalses, pero, principalmente, en los primeros, el volumen total y útil de la reserva a almacenar puede oscilar entre límites bastante amplios. Se ha de decidir en última instancia la capacidad más conveniente por consideraciones económicas, basadas en la comparación del incremento del coste de la obra con el aumento correspondiente de la reserva que constituye el embalse.

En nuestro caso, no obstante, no podemos «a priori» efectuar dichos estudios económicos sin tener una idea completa de las aportaciones utilizables por cada vaso, producciones conseguidas, misión que cada uno de los lagos o embalses ha de llenar como parte del sistema hidroeléctrico general, y mejora que cada uno de ellos constituye en los saltos de caudal fluyente que afecta, como consecuencia de la regulación efectuada del río.

Como todo ello debe a su vez ser determinado como resultado del estudio y sistematización que nos ocupa, es lógico que debamos tomar, en primera aproximación, para las capacidades que se han de constituir en los citados lagos y embalses, los valores máximos que resulten solamente de una estimación intuitiva de los costes y dificultades de las obras de cierre, habida cuenta de la topografía y constitución geológica del terreno e intereses afectados por las mismas.

#### 2. CONSIDERACIONES SOBRE LA FORMA DE UTILIZACIÓN PRUDENCIAL DE LAS RESERVAS

La utilización de los volúmenes constituidos en los lagos y embalses de regulación anual e interanual, ha de estar presidida por las conveniencias de explotación del sistema.

Las capacidades previstas, como hemos dicho en el apartado anterior, han sido en principio fijadas en forma hasta cierto punto independiente de los valores de aportaciones afluentes en cada caso.

Por otra parte, estos volúmenes regularizables varían según las épocas del año y de uno a otro año en forma muy diversa.

En consecuencia, es evidente que debe determinarse



la forma en que deben ser consumidas las reservas constituídas, a fin de conseguir el mejor rendimiento en la explotación y la seguridad y continuidad máximas en el mantenimiento del servicio en todos los años y a lo largo de cada año.

Como se ha dicho en el capítulo anterior, durante los tres meses de deshielo las aportaciones son máximas, descendiendo en general bastante, salvo dos o tres meses lluviosos, durante el período de sequiaje. Es el período de deshielo, pues, el que se considera apto para la recuperación total o parcial de las reservas, cuyo consumo, también total o parcial, se efectúa durante los nueve meses de sequiaje.

Al final de cada sequiaje, en buena explotación, es cuando pueden tenerse más bajas las reservas, en la confianza de que normalmente el exceso de aportaciones de los tres meses de deshielo permitirán llevarlas de nuevo a su valor más alto.

Ahora bien, es prudente no excederse de un cierto valor de consumo, a fin de evitar que, en caso de un deshielo, queden las reservas en cantidades insuficientes para hacer frente al sequiaje siguiente. El problema consiste, pues, en determinar qué parte del volumen embalsado en cada lago o embalse puede ser consumido anualmente.

Tal problema se resolvía en el sistema hidroeléctrico de las compañías más importantes del actual sistema catalán, considerando como reserva consumible en cada período de sequiaje aquella que con toda seguridad podía reponerse en el deshielo más seco del que se tenía experiencia.

El deshielo que hasta hace pocos años resultó más seco en los ríos aprovechados por las referidas compañías del actual sistema catalán, fué el del año 1929 (año hidráulico 1928-29). Teniendo en cuenta, por otra parte, que las aportaciones de tal deshielo fueron más que suficientes para el llenado de los embalses, dada la capacidad total que permiten éstos, el problema quedaba limitado a los lagos de cabecera. En éstos, se consideraba como reserva consumible cada año, o reserva anual (llamada reserva A), sencillamente al volumen de aportaciones correspondientes a cada lago, durante el deshielo de 1929, por ser, como hemos dicho, el más seco registrado, y por considerarse que durante el deshielo no había ningún consumo de los caudales afluentes a tales lagos.

Con ello, se creía tener la seguridad de la reposición, en cualquier deshielo, de la reserva A y, por tanto, ésta podía consumirse impunemente en cualquier período de sequiaje.

El resto de volumen de reserva de cada lago, hasta su capacidad total, era parte no reponible con seguridad de un deshielo cualquiera (su reposición exigía, por tanto, varios años) y por ello se reservaba su consumo para los años secos, haciendo las veces de «socorro térmico». Esta es la llamada reserva hiperanual. Tal concepción era completamente segura y lógica, habida la experiencia de los años hasta ha poco transcurridos.

Pero, lamentable e inesperadamente, han surgido en los últimos años, por dos veces, unas condiciones hidrológicas que se apartan completamente de las imperantes, durante casi todo lo que va de siglo.

En efecto, hemos registrado, en primer lugar, la extremada sequía del año hidráulico 1944-45, cuyas excepcionales características de escasez y débiles deshielos no se habían dado, por lo menos, en todos los 33 años de los que se poseen datos de aforos. Y, actualmente, estamos sufriendo las durísimas condiciones de sequía que empezaron en el anterior y que han afectado totalmente al año hidráulico 1948-49 que acaba de finalizar. Aún más mezquinos los caudales circulados por los ríos en éste, así como los deshielos, que en el anterior año extremadamente seco 1944-45.

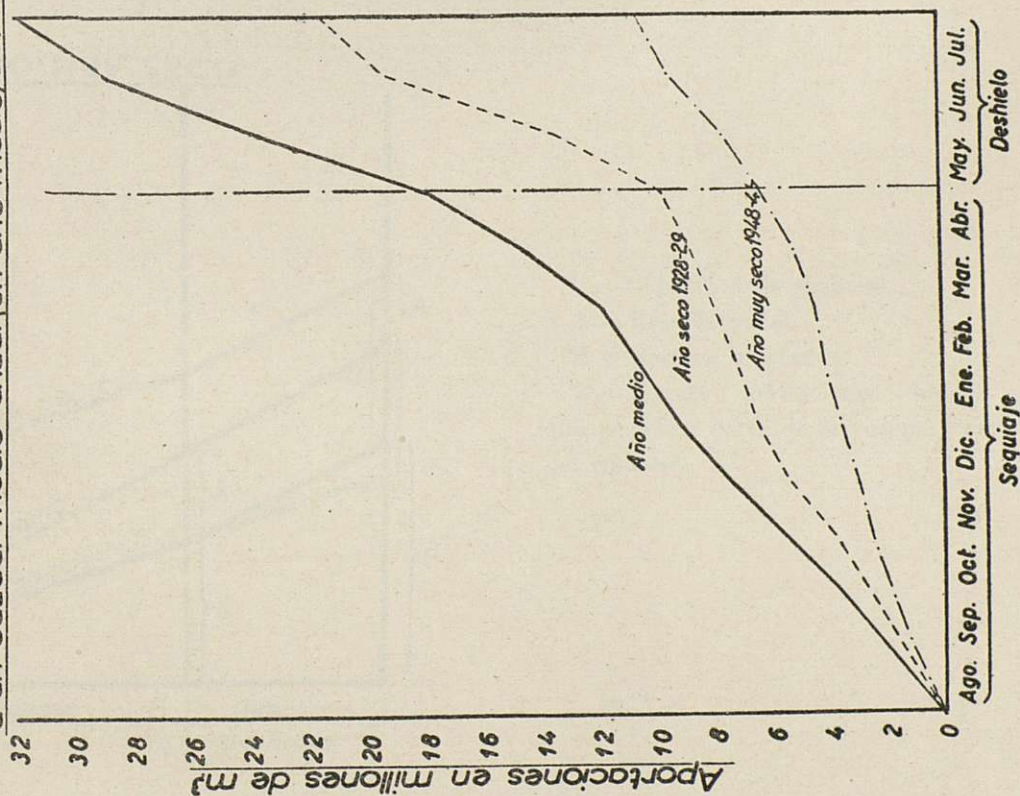
Como consecuencia, no pueden ser ya utilizadas las concepciones expuestas para la clasificación o división de reservas anuales A o hiperanuales, pues, de aplicarlas en los años parecidos a los aludidos, forzosa-mente se terminarían con unas reservas agotadas por completo o menores de las indispensables para hacer frente al año siguiente, el cual, aun siendo bueno, resultaría, en aquella eventualidad, de explotación deficiente durante el período de sequiaje.

Es fácil comprender tal consideración teniendo en cuenta que así como en el caso de un deshielo de tipo del año 1929, sus aportaciones resultarían suficientemente abundantes para permitir dejar completamente cerrados los lagos para la reposición de su reserva A, en el caso de los deshielos de 1945 ó 1949, tal cosa no podría lograrse, al tenerse que consumir irremediablemente, durante los mismos meses de deshielo, y al ser bajos los caudales fluyentes, parte o la totalidad



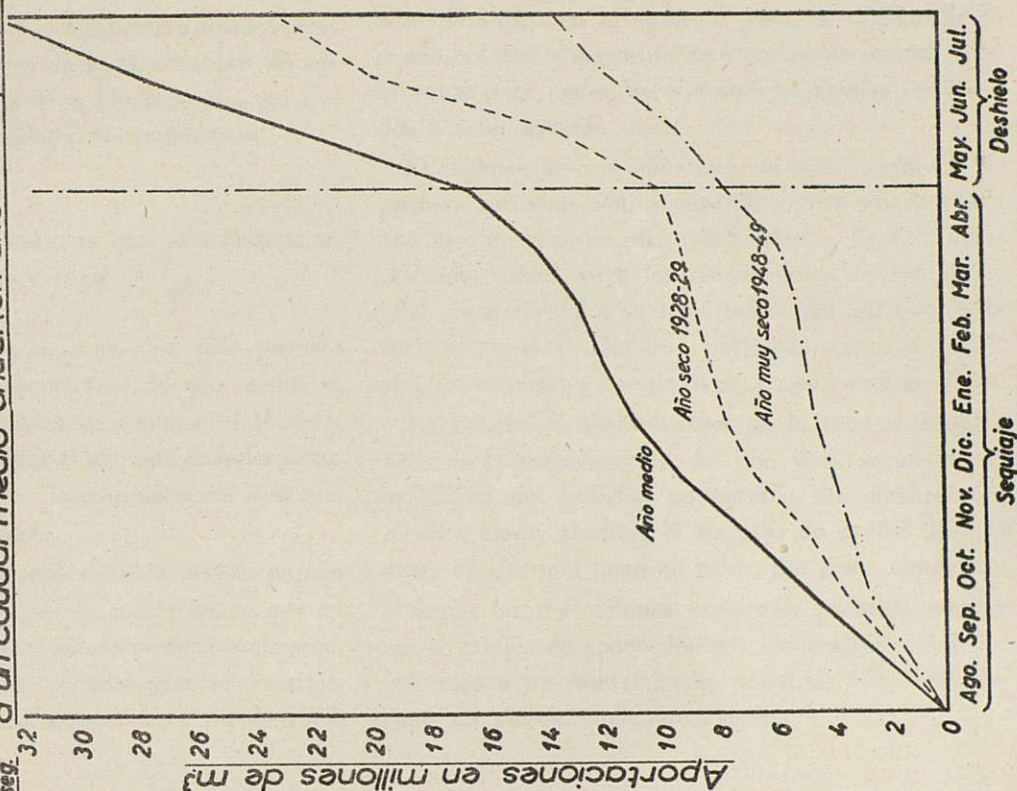
## PUENTE MONTAÑANA

Aportaciones mensuales acumuladas referidas a un caudal medio anual (en año medio) de  $1\text{m}^3/\text{seg.}$



## BOHI

Aportaciones mensuales acumuladas referidas a un caudal medio anual (en año medio) de  $1\text{m}^3/\text{seg.}$





*[Faint, illegible text visible through the paper, likely bleed-through from the reverse side.]*



de las aportaciones de deshielo que hubieran de destinarse a su recuperación.

Por consiguiente, después de considerar el problema de varias maneras, se han establecido unas nuevas definiciones o concepciones de lo que habían de ser las reservas A o anuales y H o hiperanuales, para la mejor seguridad y continuidad de la explotación.

### 3. DEFINICIÓN DE LAS RESERVAS QUE SE ESTABLECEN EN ESTE PLAN

Entendemos como reservas anuales aquellas precisas para asegurar, con las aportaciones de año medio, el régimen de consumos que interese o quepa establecer y a base de empezar y terminar el año con embalse lleno, limitadas, sin embargo, por la consideración a la que seguidamente nos referimos.

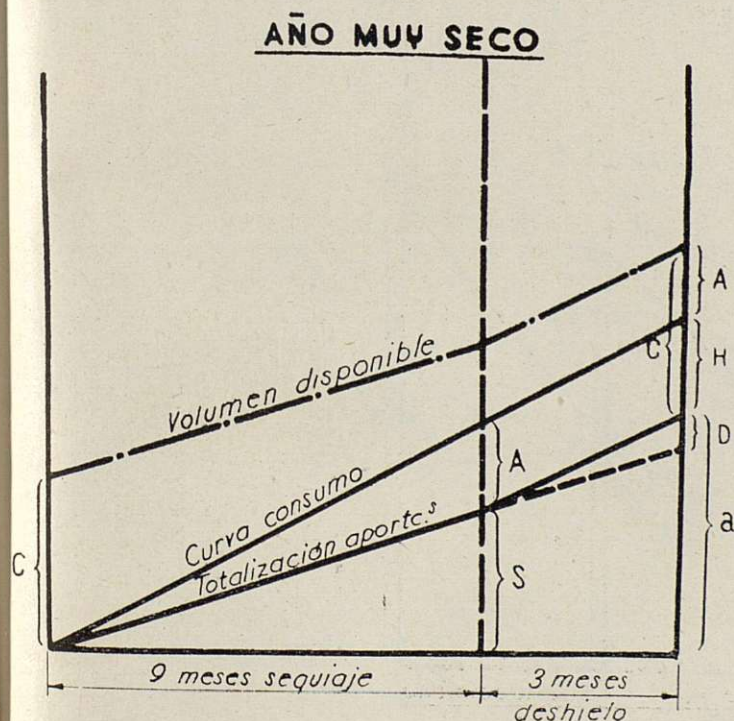
El volumen de reserva A, que se ha de utilizar en año medio, viene determinado por la condición de que en el supuesto de presentarse un año extremadamente seco, partiendo de embalse lleno al comenzar el sequiaje, y quedar consumida dicha reserva A, a fin de abril,

pueda continuarse trabajando durante el deshielo con el mismo caudal regularizado que ha habido en el período de sequiaje precedente, y quede al final del año hidráulico en el embalse, para su utilización en el año hidráulico siguiente, un volumen de reserva igual al anual para poder hacer frente en buenas condiciones a este segundo año.

El régimen de consumos que, de modo general y en primera aproximación, se considera como máximo para año medio, es el de un caudal relativo de 1,25 veces el medio anual, para los nueve meses de sequiaje y otro regularizado a lo que resulte del anterior para los tres meses de deshielo, partiendo, como se ha dicho, de empezar y terminar el año con embalse lleno.

La condición determinativa de la reserva anual a base de la consideración del año seco, según sea la capacidad del embalse, no permite, sin embargo, en muchos casos, alcanzar el régimen de caudal de 1,25 antes citado, que tiene un valor, por tanto, limitativo.

Según las definiciones expuestas, podemos establecer el gráfico de aportaciones y consumos acumulados referidos a un caudal medio anual de  $1 \text{ m}^3/\text{seg.}$  durante un año extremadamente seco.



- C = Capacidad de embalse.
- A = Reserva anual.
- H = Reserva hiperanual.
- D = Exceso aportaciones deshielo que permiten parte de la recuperación del embalse.



Utilizando las anotaciones que aparecen en el mismo gráfico, podemos llegar a la obtención de la siguiente fórmula:

$$A = \frac{3}{7} (C + D) = 0,43 (C + D)$$

valor que, para cada caso, nos determina la capacidad de la *reserva anual*, que hemos llamado A.

Si designamos ahora por  $s$  a las aportaciones totales del sequiaje del año extremadamente seco, y por  $a$  a las aportaciones totales anuales, queda determinado D por:

$$D = a - \frac{4}{3} s$$

La diferencia entre el volumen de reserva A y la capacidad total del embalse es lo que constituye las *reservas hiperanuales* que se destinarán únicamente a ser consumidas en años secos para cubrir las diferencias entre el régimen de consumos deducido como

se ha expuesto anteriormente, y las aportaciones totales del año que se considere.

Volviendo a las fórmulas antes deducidas, la reserva hiperanual H vendrá determinada por la fórmula:

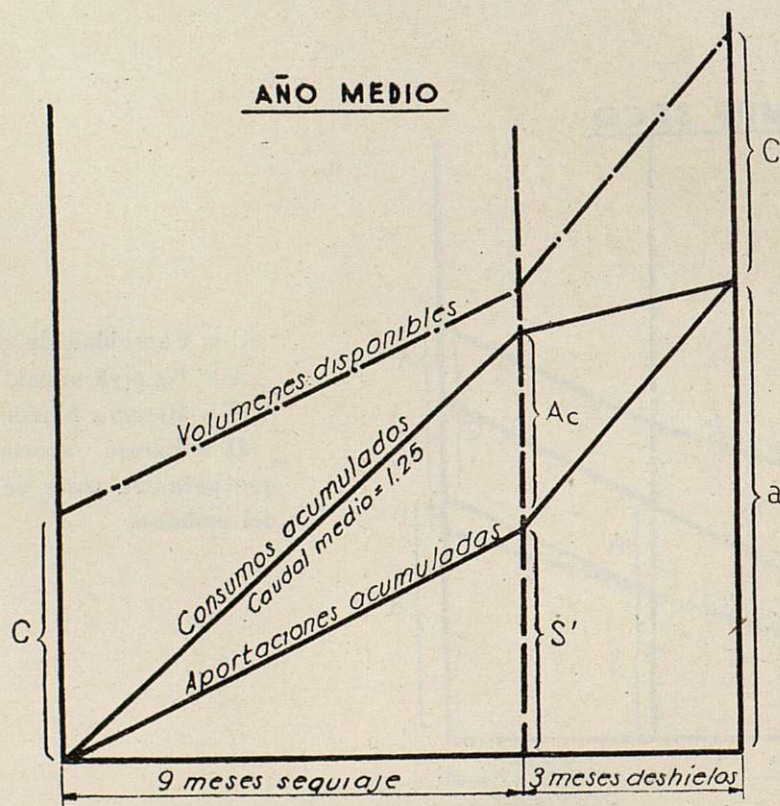
$$H = C - A = \frac{4}{7} C - \frac{3}{7} D.$$

#### 4. RESERVAS ANUALES CRÍTICAS DEL EMBALSE

Fijado en 1,25 el caudal relativo medio que se haya de consumir en el sequiaje del año medio, el volumen de reserva anual que nos permita conseguir este régimen constituirá lo que llamamos *reserva A crítica*.

La capacidad de embalse necesario para obtener dicha reserva A crítica es el denominado *embalse crítico*.

Si establecemos las curvas de aportaciones y consumos acumulados para año medio, los valores antes citados quedan fijados como sigue:





Reserva anual crítica (referida a caudal unidad) :  
 $A_c = 1,25 \times n.^{\circ}$  segundos período de sequiaje — s'  
 $= 1,25 \times 23.587.200 — s'$

De la fórmula deducida más arriba para A, despejando C:

$$C = \frac{A}{0,43} - D$$

de donde el embalse crítico será:

$$C_c = \frac{A_c}{0,43} - D$$

La capacidad crítica de embalse  $C_c$  es la única precisa para asegurar el régimen de consumos previstos en año medio; por tanto, los excesos embalsados como consecuencia de un mayor embalse disponible, pasan a constituir unas super-reservas hiperanuales, las cuales, de no intentar suprimir por reducción de las obras de los embalses, pueden dedicarse a incrementar los caudales regularizados de los años extremadamente secos.

La fórmula que determina las super-reservas es:

$$H_s = C - C_c$$

De todas estas concepciones generales se hará uso en el Capítulo VIII al encuadrar los regímenes de caudales y producciones de los aprovechamientos.

## CAPITULO V

### SOLUCIONES CONSIDERADAS EN LA ELECCIÓN DE LOS APROVECHAMIENTOS

#### 1. CRITERIO SEGUIDO EN LA FIJACIÓN DE APROVECHAMIENTOS A PREVER

Los distintos estudios efectuados relativos a la mejor forma de aprovechar diversos tramos del río, con el fin de llegar a concretar los saltos y embalses, que han de constituir el sistema de aprovechamientos de la cuenca, se han desarrollado con la idea de alcanzar las finalidades esenciales siguientes:

- a) Una máxima utilización de los desniveles, evitando, en lo posible, soluciones de continuidad, salvo las estrictamente necesarias por razones de orden técnico —tales como la necesidad de dar ciertos márgenes o huelgos, entre el nivel de un embalse y el desagüe del salto inmediato

superior, para evitar aterramientos en el mismo durante las avenidas— o impuestas por consideraciones económicas de todo punto evidentes.

- b) Consecución de la mayor capacidad posible de embalse, dentro, naturalmente, de condiciones económicas aceptables, con el fin de conseguir una máxima regularización de las disponibilidades hidráulicas del año, y también una cierta compensación entre distintos años.
- c) El menor número posible de centrales, compatible con el aprovechamiento integral expuesto y dentro de condiciones económicas satisfactorias, al objeto de ahorrar gastos de explotación y la consiguiente simplificación de la misma.
- d) Emplazamiento de centrales en zonas que impliquen el mínimo gasto de construcción de vías de acceso, disponiendo, además, las restantes instalaciones de los saltos, principalmente canales, por las laderas en las que resulte más conveniente la construcción de carreteras o por las que se desarrollan ya las actualmente construidas.
- e) Consecución de máxima elasticidad en la explotación del sistema, creando saltos de punta donde las circunstancias lo hagan aconsejable, con el fin de obtener, en cualquier caso, aun en el más desfavorable que quepa prever, fácil acoplamiento de la producción al factor de la demanda.
- f) Coordinación entre los distintos saltos, al objeto de que las influencias recíprocas resulten lo más beneficiosas posibles, procurando reducir al mínimo, y sólo cuando con ello se obtengan ventajas que lo justifiquen, las modificaciones a prever en los saltos afectados por otros, aguas arriba, tales como mayor capacidad de canales para absorber descargas de puntas de aquellos, o necesidad de contraembalses para deshacer o transformar tales irregularidades de descarga, etc.

Todo ello, como se comprende, es, en cuanto hace referencia a las líneas generales de las disposiciones previsibles para tales aprovechamientos, pues en cuanto a situación exacta de sus distintas instalaciones y características de detalle que haya que prever para



las mismas, es evidente que no pueden ser concretadas hasta desarrollar los proyectos parciales de cada uno de los distintos aprovechamientos.

## 2. INDICACIÓN DE LOS ESTUDIOS GENERALES REALIZADOS PARA ESTABLECER LOS APROVECHAMIENTOS QUE PRECISA DESARROLLAR

En esencia, los estudios generales desarrollados lo han sido para fijar la solución correspondiente a cada uno de los siguientes tramos de ríos o cuencas:

- a) Noguera Ribagorzana, entre Senet y Forcat, y tramos medio e inferior del río Llauset (estudiadas y comparadas 4 soluciones).
- b) Cuenca de Bohí (estudiadas y comparadas 3 soluciones).
- c) Zona de la confluencia del Noguera Ribagorzana y el Noguera de Tor (estudiadas y comparadas 7 soluciones).
- d) Cabecera del Ribagorzana, aguas arriba de Senet, incluida la cuenca del río Llauset (estudiadas y comparadas 7 soluciones).
- e) Zona media del Ribagorzana, comprendida entre Sopeira y Santa Ana (consideradas 9 soluciones agrupadas en dos sistemas generales).

Además de dichos estudios, ha habido, naturalmente, otros comparativos de distintas soluciones para la utilización de un determinado desnivel, así como otros determinativos de cotas de tomas y desagües, etc.

Haremos aquí únicamente una ligera descripción de las soluciones consideradas para la zona media del Ribagorzana, dada la importancia de los embalses y saltos que entran en juego en esta zona.

## SOLUCIONES CONSIDERADAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ZONA MEDIA

### 1.º AGRUPACIÓN DE LAS SOLUCIONES EN DOS SISTEMAS GENERALES.

Habida cuenta del desnivel de 128 m. existente entre la cuenca del Ribagorzana y la del Pallaresa, en el paralelo que pasa aproximadamente por Pont de Montañana, y de la facilidad que existe para pasar de la una a la otra mediante un corto recorrido, añadido

a la circunstancia de hallarse ya construídos varios embalses y aprovechamientos hidroeléctricos en la cuenca del Pallaresa, que habrían de permitir una rápida y económica ampliación de sus producciones, el aprovechamiento hidroeléctrico de la zona media del Ribagorzana, aguas abajo de la salida del salto de Escalles, puede realizarse —según se previó ya en el Plan del I. N. I., que sirvió para constituir la reserva de la meritada cuenca— bien por medio de una serie escalonada de saltos en el mismo Ribagorzana, que utilizarían todas las aportaciones normales de la cuenca, o bien trasvasando parte de las aguas al Pallaresa para permitir el aprovechamiento del mayor desnivel, más el de los saltos ya existentes en este último río y en el Segre, con independencia del aprovechamiento del resto no trasvasado en la propia cuenca del Ribagorzana.

Para más rápida comprensión del sistema a base de trasvase, se adjunta un esquema general de lo que es su esencia.

Tanto en uno como en otro sistema, son posibles distintas formas de realizar el aprovechamiento de las aguas. Nos proponemos examinar a continuación todas las imaginables y elegir la mejor dentro de cada uno de los grupos señalados para que, en ulterior comparación de estas dos mejores soluciones, quepa decidir la que se estime más conveniente.

### 2.º SOLUCIONES QUE PRECISA CONSIDERAR SIN TRASVASE.

Dentro de las soluciones sin trasvase, que se convino en llamarlas A, se han considerado 6, impuestas todas ellas por la realidad topográfica de la existencia de los congestos de Montrevey y Canelles (además del de Santa Ana), aptos para su cierre con presas de gran altura.

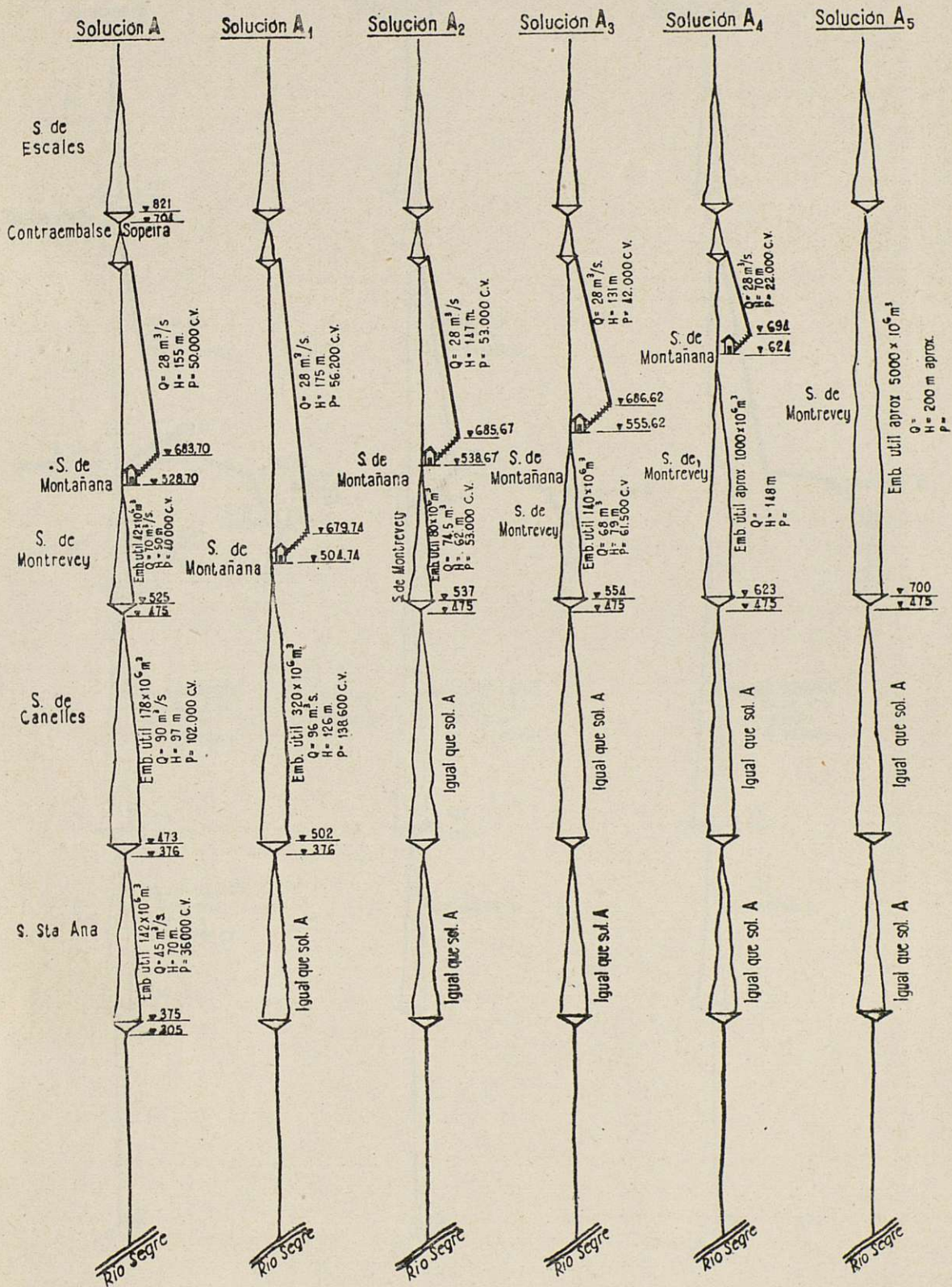
En el adjunto correspondiente se representan esquemáticamente los saltos que comprende cada una de las soluciones consideradas y sus características principales.

### 3.º SOLUCIONES CONSIDERADAS CON TRASVASE.

Dentro de las soluciones con trasvase, que se designan por B, cabe considerar 3, directamente comparables en vigor con la A original y A<sub>1</sub>, se vió ya desde un principio que no serían procedentes soluciones que



**ESQUEMAS DE LAS SOLUCIONES POSIBLES, SIN TRASVASE, PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ZONA MEDIA DEL RIBAGORZANA.**

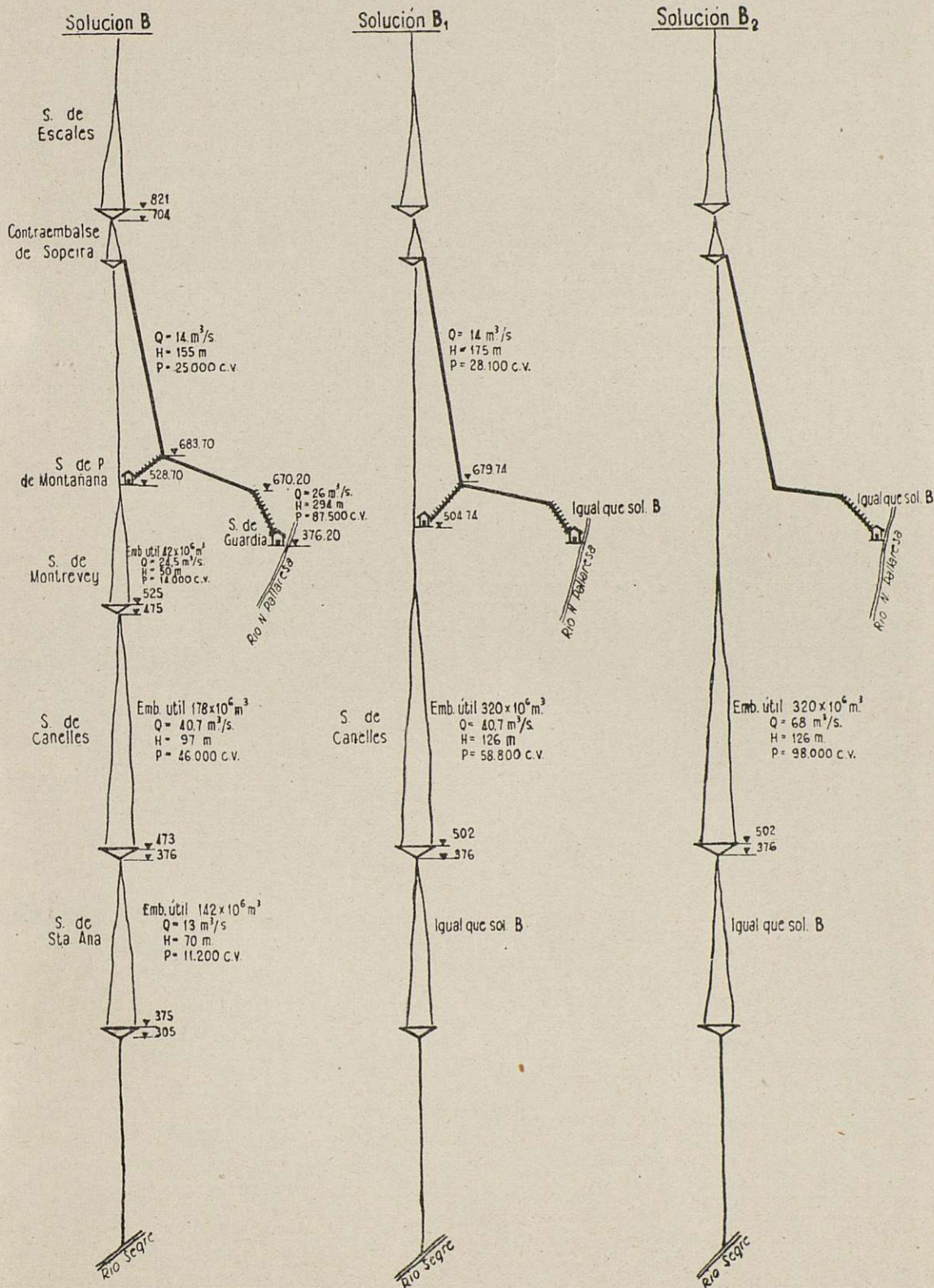








ESQUEMAS DE LAS SOLUCIONES POSIBLES CON TRASVASE, PARA  
EL APROVECHAMIENTO DE LA ZONA MEDIA DEL RIBAGORZANA.

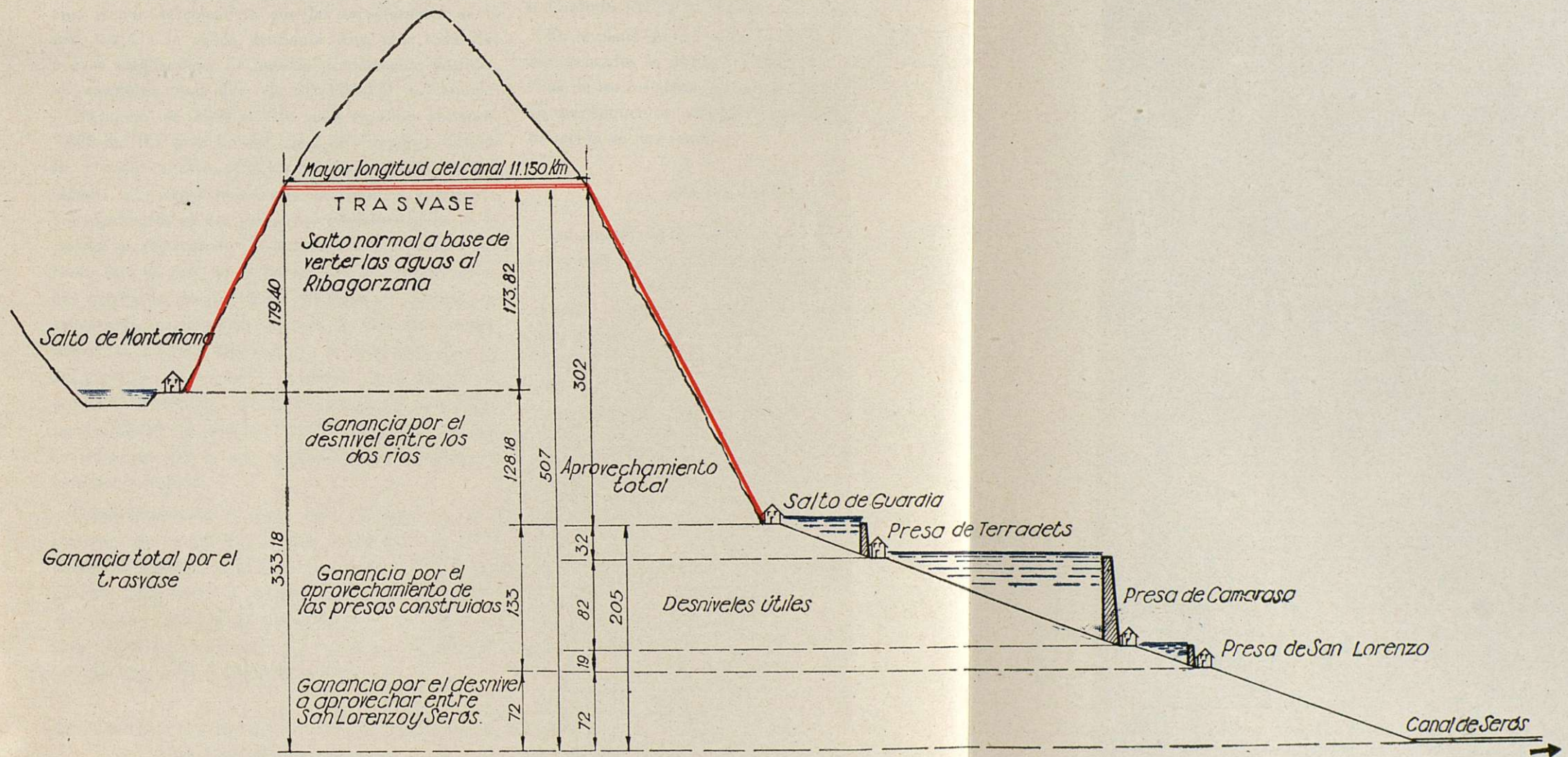






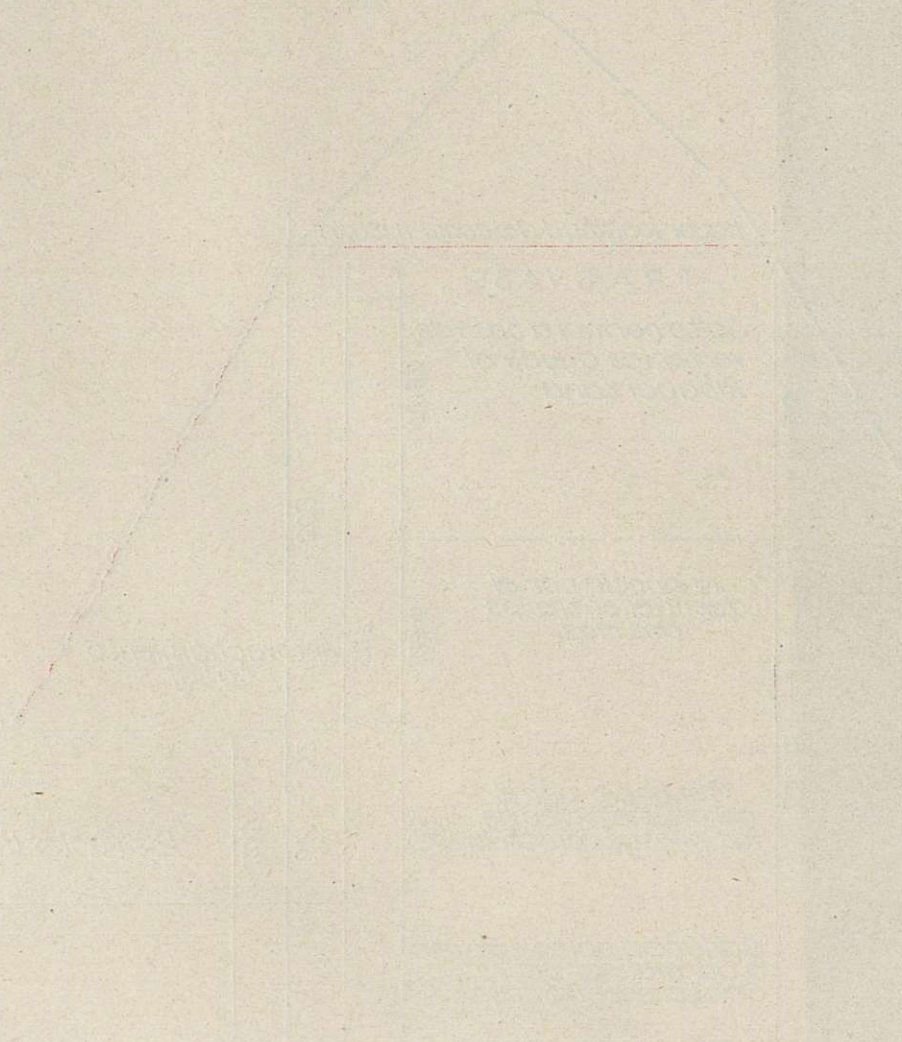


## ESQUEMA DEL TRASVASE DE MEULL





EXPOSICIÓN DE LA ARQUITECTURA





implicasen mayor altura de Montrevey, por no permitir en este caso tal aumento ningún acortamiento en el canal procedente de Sopeira, al tener que llegar el mismo forzosamente hasta La Guardia de Tremp en el Pallaresa.

En el esquema adjunto pueden verse los saltos que comprende cada una de las soluciones consideradas y sus principales características.

#### OBSERVACIÓN COMÚN.

Es de señalar que en todas las soluciones de trasvase, aun cuando se considera que las servidumbres de la zona baja a la salida de Santa Ana, más todas las nuevas ampliaciones de regadío técnicamente posibles, no requieren más allá de 286.920.000 m.<sup>3</sup> anuales —dotaciones de 9.000 m.<sup>3</sup>/Ha. para regadíos antiguos. 7.000 m.<sup>3</sup>/Ha. para los del canal de Aragón y Cataluña, y 6.000 m.<sup>3</sup>/Ha. para los de la zona nueva de Balaguer, más otras atenciones de carácter general—, principalmente en los primeros veinticinco años de la puesta en eficacia de las nuevas zonas regables; período éste en que ya se habrán podido recibir grandes beneficios por la mayor cantidad de energía suministrada, partimos de la base de respetar íntegramente las reservas previstas por la Administración en su proyecto del pantano de Santa Ana, formulado por la Confederación del Ebro cuando no se conocía la posibilidad de hermanar la finalidad agrícola que se perseguía con la que a nosotros nos incumbe de carácter industrial.

Consecuentemente, y como acaba de expresarse, los trasvases en cualquiera de sus soluciones o modalidades, se consideran a base de respetar el consumo previsto para regadíos por la Confederación e igual a un volumen anual de 494.857.000 m.<sup>3</sup>, con lo que estimamos haber extremado el respeto que se merecen la Administración y los fines agrícolas.

#### 4.º COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES DEL ESTUDIO COMPARATIVO.

Por consideraciones económicas y otras se llega, en definitiva, a la conclusión de ser la A<sub>1</sub> la solución más conveniente de todas las A, y la B, la procedente de todas las B.

## CAPÍTULO VI

### DESCRIPCIÓN DE LOS APROVECHAMIENTOS ADOPTADOS

A continuación se hace una exposición sumaria de los aprovechamientos actualmente concebidos como consecuencia de los distintos estudios generales a los que se ha hecho mención en el capítulo anterior, indicando para los mismos sus características de alturas de salto, caudales y potencias, pero estos últimos a base ya de los resultados que se obtienen y acusan en el Capítulo VII de la presente Memoria.

En el plano de la cuenca a escala 1:200.000 figuran representados la situación, trazado y otras características de las instalaciones que comprenden los distintos aprovechamientos actualmente previstos y que a continuación se describen.

#### *Central de Moralets*

La central de Moralets alojará los grupos de dos saltos concebidos para el aprovechamiento de las aportaciones y lagos de las dos laderas del Ribagorzana superior, y que se denominarán Salto de Biciberri y Salto del Llauset.

Por lo que hace referencia al primero de ellos, la salida del mismo nombre se cerrará con una presa de unos 20 m. de altura, constituyendo un embalse de aproximadamente 1,5 millones de m.<sup>3</sup> útiles. Del embalse arrancará una galería en conducción forzada por la margen izquierda del Ribagorzana hasta la central de Moralets, constituyendo un salto bruto de altura máxima, a plena carga, de 620 m., caudal 1 m.<sup>3</sup>/seg. y potencia instalada en turbinas de 7.000 CV.

Por otra parte, se alojará en la misma central la maquinaria del salto del Llauset y Salencas. Dicho salto estará constituido por una galería forzada, que arrancará del embalse formado en el lago Llauset, mediante una presa de unos 35 m. de altura y con capacidad útil de unos 10.000.000 m.<sup>3</sup>, y en esa galería confluirá la conducción que derivará las aguas fluyentes del Salencas y de la cuenca de Anglios. El referido salto tendrá una altura bruta máxima, a plena carga, de 820 m., el caudal máximo será de 2,8 m.<sup>3</sup>/seg., y la potencia instalada en turbinas de 26.000 CV.

Las tomas en el Salencas y en la cuenca de Anglios



estarán a cota algo superior al máximo nivel del embalse del Llauset, de tal forma que durante las horas de carga inferior a la correspondiente a la aportación disponible de dichas derivaciones, el agua de las mismas podrá pasar total o parcialmente al embalse del Llauset, que servirá, por tanto, de regulador anual y diario de todas las cuencas afluentes al salto.

La capacidad total del Moralets será, pues, de 33.000 CV. en turbinas y 23.500 kw., con 29.400 kVA. en alternadores.

#### *Salto de Senet*

Consta, en esencia, de una pequeña presa de derivación sobre el Ribagorzana, con su coronación a la cota 1310,81, poco más aguas abajo del lugar donde estará ubicada la central de Moralets. El canal tiene una longitud total de 3,8 km. con capacidad para 5 m.<sup>3</sup>/seg.; la central está emplazada en un prado, al pie del escarpado inmediato a la cascada de Senet; la altura de salto bruto es de 217,26 m., la potencia instalada en turbinas de 12.200 CV. y la capacidad de alternadores de 8.600 kw., con 10.800 kVA.

#### *Salto de Bono*

Lo mismo que para el salto de Senet, las características y detalles del de Bono figuran perfectamente especificadas en el nuevo proyecto, de fecha 15 de julio próximo pasado, presentado a la Administración del Estado.

Está constituido, en esencia, por un canal de 5,7 km. de longitud, con capacidad para 6 m.<sup>3</sup>/seg., que arrancará del mismo desagüe de Senet. La central está emplazada en un pequeño llano, inmediatamente aguas arriba del estrecho de Forcat; la altura de salto bruto es de 81,72 m., la potencia en turbinas de 5.500 CV., la capacidad de alternadores de 3.800 kw., con 4.700 kVA.

#### *Salto de Vilaller*

Las instalaciones componentes del salto comprenden, en esencia: una presa de tipo móvil, a base de compuertas, en el estrecho de Forcat, constituyendo un pequeño embalse a cota 1.002,05; un canal de 6,316 km. de longitud y capaz para 7 m.<sup>3</sup>/seg., que se desarrolla por la ladera izquierda; la tubería, em-

plazada en un tramo más escarpado de ladera donde el valle forma un estrechamiento, y la central, ubicada en un prado al lado mismo de la carretera y en la que se instalará, asimismo, la maquinaria del salto de Baliera, al que seguidamente nos referimos.

La altura de salto bruto es de 76,05 m., la potencia en turbinas de 6.080 CV. y la capacidad de alternadores de 4.200 kw. con 5.250 kVA.

#### *Salto de Baliera*

Dicho salto utilizará las aguas derivadas del río Baliera a la cota aproximada de 1.349 m., al objeto de aprovechar el paso del canal por un pequeño puerto, desde la ladera izquierda del Baliera a la derecha del Ribagorzana, frente, precisamente, a la baja de la tubería del salto de Vilaller (al desarrollarse la del salto del Baliera en el contrafuerte de la ladera derecha del estrecho que en aquel punto forma el valle del Ribagorzana), circunstancia que permite la utilización de una misma central para dicho salto del Baliera y el de Vilaller.

La capacidad del canal se prevé para 1,5 m.<sup>3</sup>/seg. La altura de salto bruto resultante será de 416 m., la potencia instalada en turbinas de 6.800 CV. y la capacidad de alternadores de 4.800 kw., con 6.000 kVA.

#### *Salto del lago Negro (Cuenca de Bohi)*

Constituirá un salto esencialmente de puntas, al aprovechar, mediante una conducción enteramente forzada que arrancará del lago Negro, el desnivel existente entre el mismo (recrecido mediante una presa de 21 m.) y el embalse que se ha de hacer en el lago Caballers.

Aguas arriba del lago Negro existen asimismo varios lagos, gran parte de los cuales se prevé utilizar como embalses reguladores anuales mediante la construcción de presas, que permiten la elevación de su nivel actual y la perforación y cale de galería con las que habrá de conseguir la utilización de los volúmenes comprendidos entre sus bocas de ataque y los actuales niveles.

El volumen total útil que se ha de almacenar en dichos lagos —que son los Travesany, Monges, Gelats y otros, y, además, el propio lago Negro— representará unos 13 millones de m.<sup>3</sup>, cuya importancia es de comprender considerando que con la altura suma de todos los aprovechamientos, desde el Negro hasta el de











más aguas abajo del Ribagorzana, cada m.<sup>3</sup> representa 3,5 kw.-h., con lo que la reserva constituida en tales lagos será de unos 46 millones de kw.-h.

El aprovechamiento de referencia, por ser, según se ha dicho, de régimen de punta, no tiene conducción de agua a lámina libre, sino que estará constituido por una galería forzada de unos 400 m. entre la toma en el lago Negro y una chimenea de equilibrio, una tubería y la central que se ha de ubicar en pequeña explanación poco más aguas arriba del lago Caballers.

La máxima altura de salto bruto obtenible a plena carga de la central será de 402 m., el caudal máximo previsible de 3,5 m.<sup>3</sup>/seg., la potencia en turbinas de 15.900 CV. y la capacidad de alternadores 11.200 kw., con 14.000 kVA.

#### *Aprovechamiento de Caldas*

Dicho aprovechamiento utilizará, a la vez, las aguas del Tor, que tomará del lago Caballers, y las de su afluente el San Nicolau, cuyas aguas derivará antes de iniciarse los rápidos y cascadas de San Esprit.

La conducción procedente del Caballers será en galería forzada, partiendo del embalse que en dicho lago se constituirá mediante la construcción de una presa de 25 m. de altura, que cerrará el actual emisario. Dicha galería se desarrollará en unos 4,4 km. por la ladera izquierda del valle del Tor hasta la loma formada por el encuentro de dicha ladera con la derecha del valle de San Nicolau, lugar en el que se ubicará la chimenea de equilibrio del salto. Su capacidad se prevé para 6,8 m.<sup>3</sup>/seg.

La derivación procedente del San Nicolau será, en cambio, de lámina de agua libre, al menos en parte, y con una capacidad de unos 3,00 m.<sup>3</sup>/seg., desarrollándose en túnel por la ladera derecha del valle del San Nicolau, en una longitud de 6,0 km. y hasta la chimenea de equilibrio en la que termina la galería forzada de Caballers.

Las aguas que en todo momento se deriven del San Nicolau circularán en dirección a la chimenea de equilibrio. Desde allí, sin embargo, y según sea la apertura de las turbinas (dependiente, naturalmente, de la demanda), pasará dicho caudal, bien a la tubería forzada para su utilización, o bien, caso de no requerirse en aquel momento, al embalse de Caballers, al actuar entonces como galería de carga, pero en sen-

tido inverso al normal la que une Caballers con la chimenea de equilibrio.

El lago Caballers actuará, por tanto, como embalse de regulación diario para permitir el régimen de puntas de salto, y como embalse de regulación anual de toda aquella parte de la cuenca del Tor, aguas arriba de Caballers, que no lo esté ya por los embalses del lago Negro y superiores, así como de la del San Nicolau, que tampoco pueda resultar regulada en los embalses que a tal efecto se prevé constituir en los lagos Llong, Redó, Contraig y otros.

La capacidad total utilizable de los lagos en que se prevé constituir reservas de la cuenca del San Nicolau, será del orden de los 9,2 millones de m.<sup>3</sup>, y la de Caballers de 5,5 millones de m.<sup>3</sup>. Teniendo en cuenta que en el salto de Caldas se utilizarán, además, durante el sequiaje, parte o la totalidad de las reservas constituidas en los lagos Negro y superiores de la cuenca del Tor, cabe poder hablar de una reserva total, para el salto de Caballers, de 27,7 millones de m.<sup>3</sup>.

La altura máxima de salto bruto obtenible, a plena carga de la central, será de 447 m., el caudal total máximo (a considerar sólo para la tubería forzada y las turbinas) de 8,00 m.<sup>3</sup>/seg., la potencia en turbinas de 40.000 CV. y la capacidad de alternadores de 28.600 kw. con 35.000 kVA.

#### *Salto de Bohí*

Dicho aprovechamiento derivará las aguas del Noguera de Tor, inmediatamente después de su confluencia con el San Nicolau y aguas abajo, por tanto, del desagüe de la central de Caldas, mediante una pequeña presa.

El canal, que se desarrollará por la ladera izquierda, tendrá una longitud total de 5,2 km., de los cuales la primera mitad, comprendida entre el origen y el pueblo de Bohí, tendrá una capacidad de 9 m.<sup>3</sup>/seg. y el resto de 10 m.<sup>3</sup>/seg. para permitir la captación y aprovechamiento en el salto de Bohí de las aguas procedentes del arroyo de Tahull. El canal termina en el mismo lugar en que la ladera por donde se desarrolla se curva bruscamente, separándose del río. Allí se ubicará la cámara de carga, en la que se prevé asimismo aportar, por el extremo opuesto al de la entrada del canal principal, las aguas captadas en el barranco de Durro y derivadas mediante un canalillo.

La central estará ubicada en un prado, inmediato al



brazo principal del río Tor en las inmediaciones de Barruera, y situado al pie del escarpado en el que se instalará la tubería forzada del salto.

El caudal máximo que se ha de aprovechar, incluidas todas las aportaciones que llegan a la cámara de carga, es de 10 m.<sup>3</sup>/seg.; la altura de salto bruto 189 m., la potencia en turbinas de 21.600 CV. y la capacidad en alternadores de 15.300 kw. con 19.100 kVA.

### *Salto de Llesp*

El aprovechamiento de referencia queda aguas abajo del de Bohí, con el intervalo de una zona de muy escaso desnivel constituida por el llano de Barruera.

Las aguas se derivarán del Noguera de Tor en el estrecho de Cardet, lugar donde termina el referido llano de Barruera y empieza un nuevo tramo del río con pendiente. La presa será de tipo móvil, mediante compuertas, aprovechando el embalse que con aquélla se formará para poder modificar el régimen diario de caudales —al venir éstos influidos por la descarga de puntas de Caldas— gracias a resultar su capacidad suficiente, como consecuencia de la poca pendiente aguas arriba de la presa. La cota del nivel del agua en la toma será la de 1.079,47 m.

El canal, capaz para 10,5 m.<sup>3</sup>/seg., se desarrollará por la ladera derecha del valle —paralelamente a la carretera, actualmente en construcción, de acceso a los valles de Bohí—, en una longitud total de 5,4 km. y hasta las inmediaciones de Llesp, donde terminará en una cámara de carga del salto. De ésta arranca la tubería forzada hasta la central, que se ubicará en un prado comprendido entre el pie del escarpado de bajada de la tubería y el río. Un canal de desagüe, de sección cubierta, conducirá las aguas a un punto relativamente alejado de la central, para utilizar el máximo desnivel posible del río, dada la posición obligada de tubería y central.

La potencia total en turbinas será de 17.600 CV., y en alternadores 12.400 kw. con 15.500 kVA.

### *Salto de Pont de Suert*

Dicho salto utilizará aguas procedentes del Noguera Ribagorzana, del Baliera y del Noguera de Tor, aprovechando los desniveles de dichos ríos en la zona de su confluencia.

Las aguas del Ribagorzana se tomarán a la salida

de la central de Vilaller cota 921,34) —o, eventualmente, caso de no funcionar dicho salto, se derivarían directamente del Ribagorzana mediante un pequeño azud (cota coronación 921,40) inmediatamente aguas arriba de la central de Vilaller— para ser conducidas, mediante un canal de 4,0 km. de longitud y que se desarrollará por la ladera izquierda del valle, hasta encontrarse con el canal procedente del Tor, en el punto de unión de la ladera izquierda del valle del Ribagorzana con la derecha del valle del Tor.

La capacidad del tramo de canal de referencia será de 8,5 m.<sup>3</sup>/seg., suficiente para recoger, además del utilizado por el salto del Vilaller, el caudal procedente del desagüe de las turbinas del salto del Baliera, emplazadas, según se ha dicho, en la misma central del salto de Vilaller.

Las aguas del Noguera de Tor se derivarán mediante un azud, con coronación a cota 921,00 calculada de tal forma que el nivel en el canal, en el encuentro del mismo con el procedente del Ribagorzana, sea el mismo que el resultante para este último. El pequeño desnivel existente entre el desagüe del salto de Llesp y la toma para el salto de Pont, se prevé aprovecharlo para la instalación de una estación de aforos.

El canal de derivación del Tor se desarrollará por la ladera derecha, hasta su encuentro con el canal procedente del Ribagorzana, con longitud de 3,5 km. y capacidad de 11 m.<sup>3</sup>/seg.

De la unión de los canales procedentes del Ribagorzana y el Tor, arranca un sifón que permite salvar la depresión del Ribagorzana, pasando las aguas a la ladera derecha de dicho valle, punto al cual llegará, asimismo, el canal de derivación del Baliera, previsto para la utilización, en el salto de Pont de Suert, de las aguas de la cuenca, abajo de la presa del salto del Baliera y también las que afluentes a la misma pudieran eventualmente dejar de ser aprovechadas en aquel salto del Baliera, por estar la central fuera de servicio o resultar el caudal disponible superior a la capacidad prevista para dicho salto. Para tener en cuenta dichas diversas circunstancias, el canal de aportación del Baliera, cuya longitud resulta de unos 3,5 km., se prevé para 1,5 m.<sup>3</sup>/seg.

Del punto de unión de todas las aportaciones, arranca el tramo del canal principal, previsto para capacidad de 21 m.<sup>3</sup>/seg. y que se desarrollará, en longitud de 3,2 km., por la ladera derecha del Riba-



gorzana, hasta el punto situado frente al emplazamiento de la central, poco más aguas abajo de Pont de Suer.

La altura de salto bruto obtenible será de 90,58 m., la potencia en turbinas de 22.100 CV. y la capacidad en alternadores de 15.600 kw. con 19.500 kVA.

### *Salto de Escales*

Es un salto de pie de presa, de tipo de gravedad y de unos 120 m. de altura por encima de cimientos, la cual cerrará el estrecho denominado de Escales, cerca de Sopeira, constituyendo un embalse de 148.000.000 m.<sup>3</sup>, de los que 119.000.000 m.<sup>3</sup> serán utilizables a los efectos de regulación de las aportaciones dentro del año, así como para la consecución de un régimen variable dentro de las 24 horas del día.

La altura máxima de salto bruto, para plena carga de la central, será de 114 m. La mínima, suponiendo el mismo nivel de desagüe (lo que exactamente no puede ser, dado que la plena carga, para dicho salto mínimo, implicará un caudal de descarga menor que el máximo), será de 64 m., lo que significa la admisión de una oscilación máxima de embalse de 50 m.

El caudal a plena carga y con la máxima altura de salto posible, será de 30 m.<sup>3</sup>/seg.; fijado aquél por la capacidad de absorción de las turbinas, que han de permitir, además, y con alturas de saltos menores que la máxima, el paso de determinado caudal, ligeramente inferior, como es de adivinar, a aquel máximo de 39 m.<sup>3</sup>/seg.

La potencia en turbinas será de 50.400 CV. y en alternadores 30.000 kw. con capacidad para 45.000 kVA.

### *Salto de Pont de Montañana*

(Únicamente para el caso de la solución sin trasvase.)

Inmediatamente aguas abajo del desagüe de la central de Escales, se prevé la constitución de un contraembalse para alterar el régimen de descarga de aquélla, en el sentido que exigirá la utilización, desfasada en el tiempo, de las aguas, en el salto inmediato inferior de Pont de Montañana.

Para la constitución del contraembalse se prevé una presa, que cerrará el estrecho aguas abajo de Sopeira, creando una retenida de agua a una cota aproximada de 704. Para conseguir la modificación deseada en los

caudales que se han de utilizar en el salto de Pont de Montañana, se requiere la utilización diaria de un cierto volumen de agua, considerando en principio suficiente, a tal efecto, una oscilación de altura de unos 6 m.

El canal arrancará del referido contraembalse, con cota de agua 698 —a los efectos de poder conducir el pleno caudal previsto aun estando el nivel del embalse en su límite inferior— y se desarrollará por la ladera izquierda con una longitud total de 27,6 km., de los cuales, 15 km. se construirá en túneles, con objeto de, aparte de reducir la longitud de su trazado, evitar deslizamientos, siempre posibles dada la dudosa calidad de los terrenos en los que debería asentarse.

A la altura de la cola del embalse previsto de Canelles y aprovechando una ladera adecuada, se emplazará la cámara de carga en la que el nivel del agua será de 684,18 m., y de aquélla arrancará la tubería forzada del salto.

La capacidad del canal la prevemos para 26 m.<sup>3</sup>/seg.; algo superior al canal medio anual, asegurado durante el sequiaje por el embalse de Escales y reservas de los lagos de cabecera, de forma que el régimen diario previsible, en temporada de pleno aprovechamiento del salto, será el equivalente a 16 horas diarias a plena carga.

El desagüe de la central queda a la cota 504,78, o sea más de 2 m. por encima del nivel máximo del embalse de Canelles previsto a continuación, con lo que la altura de salto bruto obtenible será de 179,40 m., la potencia en turbinas de 53.200 CV. y en alternadores 37.600 kw., con capacidad para 47.000 kVA.

### *Salto de Meull y central de Guardia*

(Únicamente para el caso de la solución con trasvase.)

Al igual que lo indicado al tratar de la solución sin trasvase, se prevé la constitución de un contraembalse regulador diario, mediante el cierre del estrecho de Sopeira, según disposiciones idénticas a las previstas al describir el salto de Pont de Montañana en aquella solución sin trasvase.

De dicho contraembalse arrancará un canal, que siga en una longitud de 23,9 km. el mismo desarrollo que el previsto en aquel caso, hasta el punto en que por las condiciones topográficas favorables al llegar



al paralelo de Pont de Montañana, y aprovechando entrantes del valle, se dirige hacia el Este, atraviesa en túnel la divisoria entre las cuencas del Ribagorzana y del Pallaresa y prosigue luego hasta el saliente de Meull, para permitir la constitución en el mismo de un salto sobre el embalse de Terradets.

Con ello, y a base, naturalmente, de un mayor recorrido de canal pueden contarse unos 11 km. de aumento en el recorrido para el salto de Guardia sobre lo que resulta para el Pont de Montañana), se gana el desnivel existente entre una y otra cuenca en el paralelo considerado, consiguiendo con aquel recorrido suplementario de canal la utilización de 122,60 m., que son las diferencias de alturas entre el salto de Meull y el de Pont de Montañana.

La capacidad del canal será de  $26 \text{ m}^3/\text{seg.}$ , al igual que resultaba para el de Pont de Montañana, con longitud total de 38,8 km., de los cuales unos 23 km. se desarrollan en túneles atendiendo a las mismas razones aducidas en el caso de Pont de Montañana.

Las características del salto de Meull o Guardia son: altura bruta, 302 m.; caudal máximo,  $26 \text{ m}^3/\text{seg.}$ ; potencia en turbinas, 90.000 CV., y en alternadores, 64.000 kw. con capacidad para 80.000 kVA.

#### *Salto de Canelles*

##### *a) Características en la solución sin trasvase.*

Dicho salto es el de más potencia de todo el sistema. Estará constituido por un aprovechamiento, con un importante embalse de regulación y central a pie de presa.

El cierre se efectuará en el estrecho que da nombre al salto, poco más aguas arriba de Tragó de Nogueira, y mediante una presa de unos 130 m. de altura, probablemente de tipo bóveda.

La central se emplazará, probablemente, al pie mismo de la presa y las tuberías forzadas de alimentación de las turbinas arrancarán a una cota tal que habrá de permitir una oscilación máxima de salto de unos 30 m.

La altura de salto bruto máximo, a plena carga de la central y con el embalse a su nivel máximo (cota 502), será de 126 m., y la mínima, de 96 m., lo que representará una utilización posible de 320 millones de  $\text{m}^3$  de embalse. El caudal máximo, en el primer caso, será de  $98 \text{ m}^3/\text{seg.}$  fijado, dicho valor, a

base de capacidad de absorción de las turbinas, cuyas características vienen, a su vez, impuestas por la necesidad de permitir el paso de un caudal, ligeramente inferior, como es lógico, a aquel máximo de  $98 \text{ m}^3/\text{seg.}$ , pero con altura de salto menor que la máxima.

La potencia en turbinas será de 141.500 CV., y en alternadores de unos 100.000 kw., con capacidad para 124.900 kVA.

##### *b) Características en la solución con trasvase.*

La disposición general del salto de Canelles es análoga a la descrita en la solución sin trasvase, sin más modificaciones que las de caudal y de potencia.

El caudal máximo, a plena carga y embalse lleno, queda reducido ahora a  $68 \text{ m}^3/\text{seg.}$ , la potencia en turbina a 98.100 CV. y en alternadores a 69.300 kw., con 86.600 kVA.

#### *Salto de Santa Ana*

##### *a) Características en la solución sin trasvase.*

Es un salto de pie de presa del pantano cuya constitución está prevista en el Plan Nacional de Obras Hidráulicas del 5 de febrero de 1943, con la misión fundamental de asegurar los regadíos de aguas abajo, principalmente, los atendidos actualmente por el canal de Piñana, los suplementarios, que deben serlo por el canal de Aragón y Cataluña, y los nuevos regadíos de Balaguer entre el Segre y el Ribagorzana.

La presa, del tipo de gravedad y con altura de unos 80 m. sobre el actual lecho del río, cerrará el estrecho que da nombre al aprovechamiento, poco más aguas arriba de la actual presa de derivación del canal de Piñana.

El nivel máximo de embalse se prevé a la cota 375 y el mínimo a la 347, con una oscilación de salto de 28 m., que implicará la utilización de 142 millones de  $\text{m}^3$  de embalse.

La máxima altura de salto bruto, suponiendo el desagüe a la cota 305 m. y que corresponde el mismo al funcionamiento de plena carga de la central, será de 70 m., y la mínima de 42,0 m.

El caudal ha sido fijado a base de una descarga constante dentro de las 24 horas del día, asignando, por tanto, al aprovechamiento de Santa Ana carácter de



contraembalse regulador, y teniendo asimismo en cuenta que parte de las aportaciones no podrán ser utilizadas para producción de energía eléctrica, al tenerse que derivar por el canal de alimentación suplementaria del de Aragón y Cataluña, cuyo umbral de entrada debe ya de preverse a una cota muy por encima de la central de pie de presa. A base de dichas consideraciones y para el salto máximo posible, el caudal de plena carga será de 45 m.<sup>3</sup>/seg.

La potencia total en turbinas resultará de 36.000 CV. y la de alternadores 25.400 kw., con capacidad para 31.800 kVA.

#### b) Características en la solución con trasvase.

También en este caso no hay más variación que las cifras de caudal y potencias, pues la presa y demás instalaciones deberían de construirse con análogas características y para satisfacer las funciones fundamentales asignadas al pantano de Santa Ana, según ha sido ya indicado al tratar de la solución sin trasvase.

El caudal máximo a plena carga y embalse lleno será de 16 m.<sup>3</sup>/seg., con una potencia en turbinas de 12.700 CV. y en alternadores de 9.000 kw, con 11.200 kVA.

### AMPLIACIÓN EN LOS SALTOS CONSTRUÍDOS O EN PROYECTO EN OTRAS CUENCAS

Aun cuando no forman parte de nuestro programa de obras se aluden en este apartado los aprovechamientos de otras cuencas, beneficiados con el agua procedente del trasvase obtenido con el canal de Meull.

El desnivel, complementario al salto de Guardia, que se gana con estos aprovechamientos, es de 129 m. (valores medios) en los embalses, y de 72 en los saltos de canales.

## CAPITULO VII

### APORTACIONES, PRODUCCIONES Y POTENCIAS DE LOS APROVECHAMIENTOS

#### 1. RECURSOS HIDRÁULICOS

Utilizando los resultados y bases establecidos en el Capítulo III, y una vez decidida y establecida la situa-

ción y características de todos los aprovechamientos previsibles, estamos en condiciones de obtener los recursos hidráulicos disponibles para cada toma en los tres años tipo escogidos, o sea *medio teórico*, *seco* 1928-29 y *extremadamente seco* 1948-49.

Para la obtención de los valores correspondientes a los primeros años, utilizamos las curvas de caudales modulares, aplicando en el caso del año 1928-29 los índices mensuales correspondientes. En lo que se refiere a 1948-49, y dado que se tienen los aforos de todas las estaciones de la cuenca, se ha considerado mejor utilizar las curvas de caudales específicos del referido año.

En el cuadro adjunto, además de indicar las características de cada uno de los aprovechamientos en orden a superficies de cuencas —totales y partes no regularizadas— altitudes medias de ellas, caudales modulares y anuales y capacidad de los embalses, se hacen figurar los recursos hidráulicos anuales de cada aprovechamiento para los tres años tipo, clasificados en permanentes, eventuales y sobrantes cuya deducción se basa en los conceptos definidos en el Capítulo III.

De las aportaciones totales disponibles, deducimos las utilizables en lo que se refiere a los saltos de caudal fluyente, aplicando los porcentajes de utilización —por limitación de los caudales diarios a un máximo de 1,10 Q<sup>o</sup>— obtenidos al realizar el estudio hidrológico.

#### 2. INFLUENCIA DE LOS EMBALSES

Los saltos de caudal fluyente vienen en su mayor parte influenciados por la regulación debida a los embalses situados aguas arriba, por lo que, antes de realizar el estudio de los regímenes de los caudales de dichos saltos, hemos de calcular las reservas de los embalses, determinar los regímenes de los caudales en estos últimos y desglosar de las aportaciones disponibles en aquellos saltos la parte correspondiente a las cuencas regularizadas.

#### 3. CÁLCULO DE LAS RESERVAS HIDRÁULICAS

La aplicación de las fórmulas expuestas en el Capítulo IV, nos permitirá deducir las reservas anuales, hiperanuales y superanuales de los lagos y embalses.

Teniendo en cuenta que los lagos que se han de



aprovechar están situados todos ellos en la cabecera de la cuenca, y los embalses, por su parte, en la zona media del río, es aceptable que podamos simplificar la aplicación de las fórmulas y obtener dos tipos de las mismas, unas para el caso de los lagos y otras para el de los embalses.

En efecto, por estar referidas todas las fórmulas a caudal unidad, lo que puede afectar a la posibilidad de aplicación a un lago o embalse determinado, es el valor relativo de la repartición de aportación de sequiaje y deshielo, dentro del año.

Para los lagos de cabecera podemos considerar que tal repartición se da en todos ellos de la misma forma, tomando como tipo los valores encontrados para los ríos Tor y San Nicolau en Bohí.

En cuanto a los embalses, la repartición puede aceptarse que en todos ellos se dará la misma forma, tomando como tipo la obtenida para la estación de Pont de Montañana.

De esta forma, y haciendo referencia a las curvas de aportaciones acumuladas de Bohí y Pont de Montañana, tenemos:

#### LAGOS (Valores referidos a caudal 1)

	Año medio	Año muy seco
Aportaciones 9 meses sequiaje $10^6 \text{ m}^3$	15,953	7,207
Aportaciones 3 meses deshielo $10^6 \text{ m}^3$	15,583	5,808
	31,536	13,015

Y llamando  $Q^o$  al caudal medio anual del lago considerado, las fórmulas quedan establecida como sigue:

$$\text{Reserva anual crítica: } A_c = 13,53 Q^o$$

$$\text{Embalse crítico: } C_c = \frac{A_c - 1,46 Q^o}{0,43}$$

$$\text{Reserva anual: } A = 0,43 C + 1,46 Q^o$$

$$\text{Reserva hiperanual: } H = 0,57 C - 1,46 Q^o$$

$$\text{Super-reserva: } H_s = C - C_c = C - \frac{A_c - 1,46 Q^o}{0,43}$$

#### EMBALSES (Valores referidos a caudal 1)

	Año medio	Año muy seco
Aportaciones 9 meses sequiaje $10^6 \text{ m}^3$	17,550	6,126
Aportaciones 3 meses deshielo $10^6 \text{ m}^3$	13,986	4,098
	31,536	10,224

Y llamando  $Q^o$  al caudal medio anual del embalse considerado, las fórmulas quedan establecidas como sigue:

$$\text{Reserva anual crítica: } A_c = 11,93 Q^o$$

$$\text{Embalse crítico: } C_c = \frac{A_c - 0,884 Q^o}{0,43}$$

$$\text{Reserva anual: } A = 0,43 C + 0,884 Q^o$$

$$\text{Reserva hiperanual: } H = 0,57 C - 0,884 Q^o$$

$$\text{Super-reserva: } H_s = C - C_c = C - \frac{A_c - 0,884 Q^o}{0,43}$$

La aplicación de las fórmulas anteriores y obtención de los distintos valores de reserva, vienen indicados en el cuadro adjunto.

#### 4. RÉGIMEN DE LOS CAUDALES DE SEQUIAJE Y DE DESHIELO EN LOS APROVECHAMIENTOS CON EMBALSE

La determinación de los *caudales medios* de sequiaje y deshielo de todos los aprovechamientos con embalses, se ha efectuado teniendo en cuenta el consumo de reservas anuales, hiperanuales y super-reservas, las cuales, según sea el tipo de año, se hacen jugar como sigue:

<i>En año medio:</i>	Sequiaje: Consumo de la reserva A. Deshielo: Reposición de la misma.
<i>En año seco 1928-29:</i>	Sequiaje: Consumo de la reserva A y 50 % de las super-reservas $H_s$ . Deshielo: Consumo del 50 % de la reserva H (hiperanual) y reposición de la reserva A.
<i>En año muy seco 1948-49:</i>	Sequiaje: Consumo de la reserva A y totalidad de super-reservas $H_s$ . Deshielo: Consumo de la totalidad de la reserva H y reposición de la reserva A.

Cabe hacer notar que en el año seco tipo (1928-29) se ha debido aumentar ligeramente (al 57 por 100 en lugar del 50 por 100) el consumo en sequiaje de la reserva  $H_s$  de Santa Ana, a fin de respetar las servidumbres de riegos en el caso de trasvase. En la solución sin trasvase se ha tomado el mismo consumo para colocar a ambas en condiciones iguales.

En cuanto al año muy seco, y también por lo que se refiere al embalse de Santa Ana, es preciso modificar el consumo de super-reservas, sobre lo que antes se ha indicado (aun cuando ello sólo en la solución



# RECURSOS HIDRAULICOS ANUALES DE CADA APROVECHAMIENTO

APROVECHAMIENTOS	Superficie Km. <sup>2</sup>		Altitud media cuenca total Hm	Caudal especifico anual 1/seg./km. <sup>2</sup>	Caudal medio anual m. <sup>3</sup> /seg.	Capacidad embalses		Recursos AÑO MEDIO 10 <sup>6</sup> m. <sup>3</sup>				Recursos AÑO SECO 1928-29 10 <sup>6</sup> m. <sup>3</sup>				Recursos AÑO EXTREMADAMENTE SECO, 1948 — 49 10 <sup>6</sup> m. <sup>3</sup>					
	Toda la cuenca	Cuenca no regulada				Total 10 <sup>6</sup> m. <sup>3</sup>	Util 10 <sup>6</sup> m. <sup>3</sup>	Permanentes ( Zona I )	Eventuales ( Zona II )	Sobrantes ( Zona III )	TOTAL	Permanentes ( Zona I )	Eventuales ( Zona II )	Sobrantes ( Zona III )	TOTAL	Permanentes	Eventuales	Sobrantes	TOTAL		
NEGRO	15,4	15,4	2471	54,5	0,839	—	13,000	2,428	17,044	6,993	26,465	2,428	12,756	4,320	19,504	2,428	7,989	0,786	11,203		
LAGOS LLONG	12,1	12,1	2470	54,1	0,655	—	9,200	1,924	13,261	5,483	20,668	1,924	9,517	3,316	14,757	1,924	6,259	0,616	8,799		
CALDAS	Toma S. Esprit		43,0	30,9	2358	48,5	2,084	—	—	6,780	41,890	17,052	65,722	6,780	29,396	10,410	46,586	6,780	19,221	1,877	27,878
	Lago Caballers		26,4	11,0	2438	52,7	1,391	—	—	5,500	4,163	28,156	11,546	43,865	4,163	20,026	7,005	31,194	4,163	13,591	1,268
BOHI	175,0	105,6	2199	40,8	7,141	—	—	27,594	141,130	56,473	225,197	27,594	95,552	34,880	158,026	27,594	57,929	6,102	91,625		
LLESP	208,7	139,3	2128	37,1	7,741	0,200	0,150	32,924	155,074	61,542	249,540	32,924	103,232	38,082	174,238	32,924	60,306	6,574	99,804		
BICIBERRI	7,2	7,2	2400	50,6	0,364	—	1,500	1,135	7,343	3,003	11,481	1,135	5,193	1,825	8,153	1,135	3,469	0,333	4,937		
LLAUSER	Toma L. Llauset		8,9	8,9	2555	59,3	0,522	—	10,000	1,419	10,775	4,448	16,642	1,419	7,795	2,665	11,879	1,419	5,619	0,516	7,554
	Toma Salencas, R. Bueno		9,8	9,8	2555	59,3	0,581	—	—	1,545	11,890	4,900	18,335	1,545	8,608	2,932	13,085	1,545	6,210	0,568	8,323
SENET	Toma Llauset		17,6	17,6	2027	34,4	0,605	—	—	2,775	11,734	4,571	19,080	2,775	7,336	2,812	13,173	2,775	4,267	0,483	7,525
	Toma Ribagorzana		82,9	57,0	2260	43,6	3,616	—	—	13,087	71,941	29,008	114,036	13,087	49,438	17,828	80,353	13,087	30,773	3,145	47,005
BONO	100,5	74,6	2240	42,6	4,284	—	—	15,863	85,038	34,183	135,084	15,863	58,140	21,048	95,051	15,863	35,884	3,705	55,452		
VILALLER	146,6	120,7	2063	85,6	5,216	—	—	23,116	101,569	39,805	164,490	23,116	66,320	24,543	113,979	23,116	37,664	4,225	65,005		
BALIERA	41,5	41,5	2070	35,8	1,486	—	—	6,559	28,958	11,358	46,875	6,559	18,933	7,003	32,495	6,559	10,845	1,207	18,611		
R DE SUERT	Toma Baliera y Ribagorzana		283,6	257,7	1840	29,1	8,263	—	—	43,835	156,459	60,286	260,580	43,835	102,248	30,062	176,145	43,835	52,063	1,040	96,938
	Toma del Tor		239,3	169,9	2060	35,4	8,472	—	—	37,749	165,921	63,504	267,174	37,749	114,240	33,045	185,034	37,749	67,267	1,098	106,114
ESCALES	731,2	635,9	1750	27,2	19,857	148,227	119,337	112,993	367,920	145,479	626,392	112,993	236,096	72,418	421,507	112,993	110,048	2,411	225,452		
PONT DE MONTAÑANA ó GUARDIA (en soluc. trasv.)	733,0	1,8	1750	27,2	19,940	0,976	0,600	113,277	368,820	145,836	627,933	113,277	237,224	72,745	423,246	113,277	110,321	2,416	226,014		
CANELLES	1628,2	897,0	1263	18,4	29,998	575,000	320,000	118,102	589,407	238,503	946,012	118,102	382,940	122,029	623,071	118,102	157,305	2,592	277,999		
SANTA ANA	1757,5	129,3	1218	17,8	31,282	206,000	142,100	121,950	613,768	250,787	986,505	121,950	397,774	128,527	648,251	121,950	162,789	2,635	287,374		







**CÁLCULO DE LAS RESERVAS ANUALES, HIPERANUALES Y SUPER-RESERVAS  
EN LAS SOLUCIONES A Y B ELEGIDAS**  
(Valores en millones de m<sup>3</sup>)

	Capacidad útil total <b>C</b> 10 <sup>6</sup> /m <sup>3</sup>	Caudal medio anual <b>Q</b> m <sup>3</sup> /seg.	RESERVA A <sub>c</sub> (A crítica)	CAPACIDAD CRÍTICA C <sub>c</sub>	SUPER-RESERVAS (sólo cuando C <sub>c</sub> < C)	RESERVA ANUAL A	RESERVA HIPERANUAL H
			LAGOS A <sub>c</sub> = 13,53 Q EMBALSES A <sub>c</sub> = 11,93 Q	LAGOS C <sub>c</sub> = $\frac{A_c - 1,46 Q}{0,43}$ EMBALSES C <sub>c</sub> = $\frac{A_c - 0,884 Q}{0,43}$	H <sub>s</sub> = C - C <sub>c</sub>	LAGOS Si C <sub>c</sub> > C ; A = 0,43 C + 1,46 Q Si C <sub>c</sub> < C ; A = A <sub>c</sub> EMBALSES Si C <sub>c</sub> > C ; A = 0,43 C + 0,884 Q Si C <sub>c</sub> < C ; A = A <sub>c</sub>	LAGOS Si C <sub>c</sub> > C ; H = C - A Si C <sub>c</sub> < C ; H = 0,57 C <sub>c</sub> - 1,46 Q EMBALSES Si C <sub>c</sub> > C ; H = C - A Si C <sub>c</sub> < C ; H = 0,57 C <sub>c</sub> - 0,884 Q
<b>LAGOS</b> NEGRO y lagos Cuenca aguas arriba	13,000	0,839	11,352	23,551	-	6,815	6,185
SAN NICOLAU	9,200	0,655	8,862	18,386	-	4,912	4,288
CABALLERS	5,500	1,981	26,803	55,607	-	5,257	0,243
BICIBERRI	1,500	0,364	4,925	10,219	-	1,176	0,324
LLAUSET (Con trasvase Salencas)	10,000	1,109	14,924	30,963	-	5,919	4,081
<b>TOTAL LAGOS</b>	<b>39,200</b>				-	<b>24,079</b>	<b>15,121</b>
<b>EMBALSES</b>							
ESCALES	119,337	14,915	177,936	383,145	-	64,500	54,837
CANELLES	320,000	10,141	120,982	260,505	59,495	A - A <sub>c</sub> = 120,982	H = 148,488 - 8,965 = = 139,523
SANTA ANA	142,100	1,284	15,318	32,984	109,116	A - A <sub>c</sub> = 15,318	H = 18,801 - 1,135 = = 17,666
<b>TOTAL EMBALSES</b>	<b>581,437</b>				<b>168,611</b>	<b>200,800</b>	<b>212,026</b>
<b>TOTAL GENERAL</b>	<b>620,637</b>				<b>168,611</b>	<b>224,879</b>	<b>227,147</b>







con trasvase), trasladando parte del consumo de reserva  $H_s$  al período de deshielo a fin de poder hacer frente a los volúmenes necesarios para riego, tal como se indica en el cuadro correspondiente.

#### 5. RÉGIMEN DE CAUDALES Y CONSUMOS MENSUALES DE RESERVAS EN LOS APROVECHAMIENTOS CON EMBALSE

Una vez determinados los consumos y *caudales medios de sequiaje y deshielo*, pasamos a determinar la *repartición mensual* más conveniente de dichos consumos.

Por lo que se refiere a los lagos, su repartición se realiza en lo posible, de forma que, en los meses de caudal escaso, se incremente el consumo de los lagos y viceversa en los meses en que el caudal fluyente sea abundante.

La distribución de consumos mensuales en los lagos se hará en razón inversa a los caudales circulados en Bohí, que podemos considerar aplicables a todos los lagos, puesto que se hallan en cuencas características semejantes.

Sin embargo, es de hacer notar que en varios meses se han debido modificar los resultados de dicha repartición para evitar el verter agua o de dejar vacío el embalse.

En lo que se refiere a los embalses de la zona media, la repartición de consumos calculada hemos considerado conveniente que, dado el gran volumen de reservas existentes en ellos, fuesen los saltos de esta zona los destinados a complementar la producción del resto del sistema en forma tal que se adapte la producción del conjunto de una manera lo más estricta posible a la variación mensual de la demanda de energía, la repartición de la cual, a lo largo de los distintos meses, se ha hecho atendiendo a la hipótesis y razones que se indican en el apartado 9 de este mismo Capítulo.

Por lo que se refiere al año seco, si nos situamos en la posición que deberíamos adoptar en la realidad de la explotación del sistema, en que no se conoce «a priori» cómo se presentará el año hidráulico, hemos seguido una curva de descenso de embalses igual a la del año medio, por lo menos, en los cinco primeros meses de sequiaje, con la idea de no situarnos en condiciones de inferioridad a un año medio si se corregía la sequía del mismo. Por otra parte, esta prudencia permite mantener los embalses a una altura

de salto elevada y, por tanto, con mayor potencia disponible para hacer frente en buenas condiciones a la máxima punta de demanda que se presenta en los meses de diciembre y enero.

En cuanto al año muy seco, las condiciones hidráulicas son tan inferiores a las anteriores y de evidencia tal que no es posible ni lógico mantener ni aún en los primeros meses del sequiaje la curva de descenso de año medio. Se efectúa entonces un régimen constante de consumos en los nueve meses de sequiaje o de deshielo.

Todo lo anteriormente expuesto es válido en su totalidad por lo que se refiere al embalse de Canelles. En lo referente a los de Escales y Santa Ana, han debido respetarse las particularidades que a continuación se indican, y que modifican parcialmente las ideas generales antes reseñadas:

*Escales.* Ha debido tenerse en cuenta la existencia del contraembalse de Sopeira, la capacidad del mismo y la necesidad de no aumentar excesivamente la capacidad de los canales de Pont de Montañana o el de Guardia en el caso de trasvase, por lo que en lo que se refiere al año medio no se han variado, dentro de lo posible en los distintos meses, los caudales medios de los períodos de sequiaje y deshielo.

*Santa Ana.* El consumo viene generalmente obligado por las necesidades de riego y, cuando no es así, el criterio de distribución del mismo, se basa en las mismas consideraciones anteriores.

#### 6. RÉGIMEN DE CAUDALES PARA EL CASO DE LA SOLUCIÓN CON TRASVASE

Como premisa fundamental de la solución a base de trasvase, establecemos que, en todo caso, se hace preciso respetar y reservar las aportaciones necesarias para que puedan ser atendidas las servidumbres de regadío a la salida del embalse de Santa Ana, incluso de aquellas ideológicamente discutibles como la referente a la del otro trasvase, también en proyecto, de las aguas del Ribagorzana hacia las tierras agrícolas alimentadas por las aguas del Esera.

Aun cuando se podría discutir mucho el aludido auxilio, en razón a los agobios de carácter económico que se producen en la Nación por escasez y falta de energía eléctrica, y aun más, si se tienen en cuenta las posibilidades que existen de poder incrementar los



recursos disponibles de la zona agrícola a que se alude, con el recrecimiento en proyecto del pantano de Barasona, estimamos que no debemos hacerlo para la mayor compatibilidad de las necesidades agrícolas con las industriales.

En materia de cuáles deben ser las dotaciones a reservar para las necesidades agrícolas, debemos discrepar totalmente de las que se hacen figurar en el proyecto del pantano de Santa Ana, formulado por la Confederación del Ebro con vistas exclusivas a las conveniencias agrícolas y mucho antes de que se tuviera la comprobación de la gravedad de los colapsos que se sufren por falta de energía eléctrica, y asimismo, antes de que se conociera la posibilidad de asegurar la justificación del pantano por la adición, a las necesidades agrícolas, de las energéticas, que pueden ser proporcionadas gracias al trasvase y para cuya posible realización se hace absolutamente necesario el pantano de Santa Ana a que nos referimos, pero en el presente momento, con el fin de extremar la comparación que nos interesa y de evitar toda clase de recelos, partimos de la base de respetar íntegramente las dotaciones figuradas en el proyecto antes mencionado.

Consecuentemente con lo expuesto, y habida cuenta de los datos y conclusiones que figuran en el proyecto del pantano de Santa Ana, formulado por la Confederación del Ebro, debemos conseguir que a la salida de dicho embalse circulen libremente 494 millones de m.<sup>3</sup> anuales con sujeción al régimen previsto para las necesidades agrícolas y, el cual, también se respeta.

En los años medios y secos se asegura la permanencia y disfrute de 494,857 millones de m.<sup>3</sup>, cuya masa flecta a 387,722 millones únicamente para el caso excepcional de un año tan extremadamente seco como el de 1948-49; cantidad, no obstante, bastante superior a la precisa para asegurar unas dotaciones de 9.000 y 7.000 m.<sup>3</sup> por Ha. de regadío antiguo y 6.000 m.<sup>3</sup> por Ha. de nuevo regadío a más de las otras servidumbres obligadas e imprescindibles.

Debe hacerse notar que la reducción de las dotaciones de riego a 387,7 millones de m.<sup>3</sup> en las condiciones de un año muy seco como el 1948-49 es sensiblemente igual a la que deberían sufrir las servidumbres en caso de no existir ninguna de las obras de regulación del sistema ENHER aguas arriba del pantano de Santa Agueda. En efecto, en tal caso, y si supo-

nemos una utilización de las reservas de este pantano igual a las supuestas en nuestro estudio, se alcanzaría a cubrir un volumen de regadío de 414,2 millones de metros cúbicos contra los 494,9 millones de m.<sup>3</sup> apreciados como necesarios.

Por lo tanto, la disminución realmente efectuada en las hipótesis de este estudio, es sólo del 6,4 por 100 del volumen de regadío que podría asegurar el pantano de Santa Ana supuesto sólo.

#### 7. RÉGIMEN DE LOS CAUDALES MENSUALES EN LOS APROVECHAMIENTOS DE CAUDAL FLUYENTE

Una vez determinados los caudales y aportaciones mensuales de los saltos con embalse, para los saltos de caudal fluyente, cabe sumar a la parte del volumen correspondiente, a la cuenca no regularizada, los volúmenes aportados por los embalses situados aguas arriba, y así se obtiene el total de caudales y aportaciones utilizables mes por mes para todos los saltos citados.

Es preciso hacer resaltar que los caudales medios utilizables por los saltos de caudal fluyente serán algo mayores que los obtenidos por el presente cálculo, en razón a que hemos establecido una limitación de los caudales de las cuencas no regularizadas a 1,10 del caudal medio  $Q^o$ , por considerar que había que eliminar de alguna manera los sobrantes de agua que excedían a la capital de los canales, pero al preverse éstos, como luego se verá, de capacidad en general mayor que lo que resulta de tomar el 1,10 del caudal medio de año medio, se utilizará parte de los recursos que resultaban sobrantes.

Sin embargo, el error cometido al operar en la forma apuntada es de muy poca consideración, y nos coloca, además, en una situación de prudencia al resultar por defecto las producciones posibles que luego se obtienen.

#### 8. PRODUCCIONES Y POTENCIAS MEDIAS

A base de los volúmenes disponibles cada mes, tanto para los saltos con reservas, como en los restantes, estamos en condiciones de hallar las producciones realizables para cada uno de ellos. Dichas producciones se han obtenido mediante la siguiente fórmula:

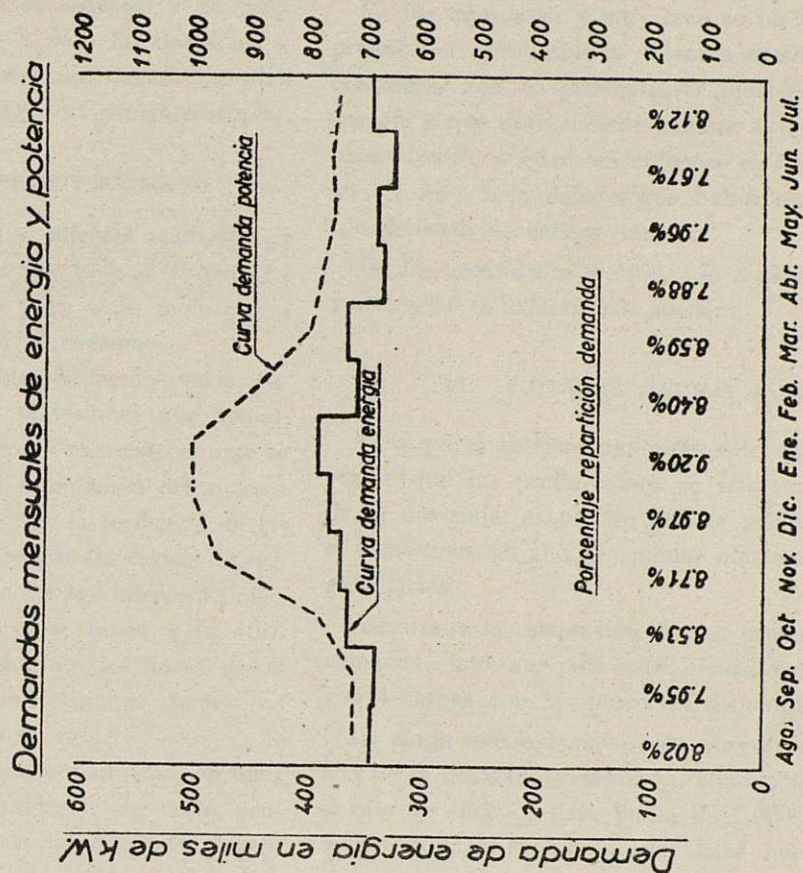
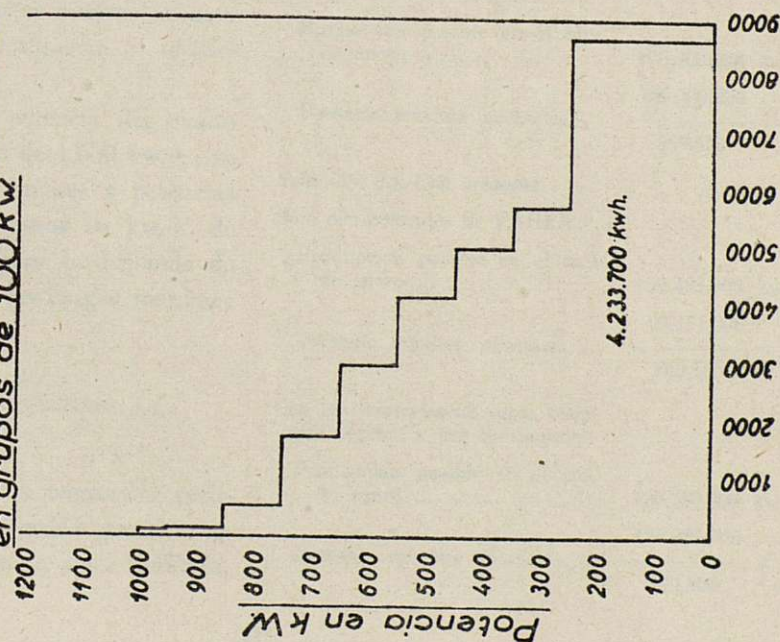
$$E = \frac{0,75 \times 1.000 \times V \times H}{75 \times 36.000} = 0,00204 \times V \times H$$



# Demanda de producción y potencias referidas a 1000 kW de punta máxima anual

(Se toma como base curvas demanda región catalana año 1935)

Clasificación de potencias máximas en grupos de 100 kW









en la que V es el consumo correspondiente a cada salto y a cada mes y H la altura del salto.

Las producciones totales obtenidas en los distintos años tipo, para los períodos de sequiaje y deshielo, de todos los saltos previstos y para las dos soluciones consideradas (sin trasvase y con trasvase) quedan indicadas en el cuadro resumen del presente estudio.

## 9. DEMANDAS DE ENERGÍA Y POTENCIA

El conjunto de producción y potencia realizable en cada día y durante cada mes por todo el sistema ha de adaptarse necesariamente y en todo momento a las variaciones impuestas por el consumo.

Si bien los regímenes de demanda pueden variar extraordinariamente, desde las previsiones que actualmente puedan establecerse hasta el momento en que se llegue a la efectividad de la explotación del sistema ahora planeado, cabe esperar que la tendencia de las modalidades del consumo mejorarán las curvas de carga diarias como consecuencia de las interconexiones peninsulares y continentales y en razón a la utilización de energía eléctrica durante las horas de la noche en las industrias y en consumos domésticos (aparatos calentadores de aguas, etc.).

Creemos, en consecuencia, que nos situamos en unas condiciones más bien desfavorables y, por tanto, prudentes, al adoptar como curvas de demanda el promedio de las dominantes en esta región en los años 1930 al 1935. No se puede adoptar ninguno de los años posteriores por estar más o menos afectados por circunstancias que han dado carácter anormal al consumo —guerra de Liberación, postguerra y restricciones—.

Clasificadas las demandas de potencia del citado año referidas a una punta máxima de 1.000 kw.-h., se obtiene el gráfico en el que, por meses y potencias escalonadas, se precisan: los consumos en kw.-h. de cada mes, los porcentajes que supone la demanda de cada mes sobre el total anual y las cargas máximas respectivas.

## 10. ADAPTACIÓN DE LAS PRODUCCIONES A LA DEMANDA

En el cálculo de las producciones mensuales realizables en año y medio se ha conseguido que ellas se ajusten a la repartición de la demanda antes indicada.

De la diferencia entre la producción realizable y la consumible, se obtienen en deshielo unos sobrantes o excedentes que son de eventual colocación.

En los años seco y muy seco se ha tomado como producción consumible la obtenida en año medio, por considerar que, en principio, es aquél el volumen de energía a que normalmente existirá el compromiso de hacer frente, y aparecen entonces en los citados año seco y muy seco déficits que habrá que cubrir con complemento de energía térmica.

De las necesidades y forma de considerar el socorro térmico se hablará más adelante.

## 11. POTENCIAS MÁXIMAS DIARIAS

Para que el sistema resulte eficiente, además de conseguir que las producciones se adapten al régimen de la demanda, es preciso que se puedan seguir, en el transcurso del año, las puntas máximas de las cargas diarias.

Asegurada la adaptación de las producciones a la demanda, interesa, por consiguiente, cubrir las máximas cargas con las potencias disponibles.

La carga máxima que puede observarse en el gráfico de la demanda mensual ya citado, tiene lugar en el mes de enero y para punta de 1.000 kw. se consumen 389.500 kw.-h., lo cual hace que precisemos en nuestro sistema de las potencias máximas de trabajo siguientes:

### Solución A.—Sin trasvase.

Producción posible en el mes de enero ... ..	106.300.000 kw.-h.
Potencia máxima necesaria ...	$\frac{106.300.000}{389.500} = 272.900 \text{ kw.}$

### Solución B.—Con trasvase.

Sólo con centrales de ENHER:

Producción posible en el mes de enero ... ..	99.491.000 kw.-h.
Potencia máxima necesaria ...	$\frac{99.491.000}{389.500} = 255.400 \text{ kw.}$

Con las centrales de otras cuencas afectadas por el trasvase:

Producción posible en el mes de enero ... ..	120.780.000 kw.-h.
Potencia máxima necesaria ...	$\frac{120.780.000}{389.500} = 310.100 \text{ kw.}$



Como en el mes de enero los caudales sin regulación circulados por los ríos son prácticamente los mínimos del año, para alcanzar las potencias máximas señaladas se hace preciso recurrir a los embalses y, naturalmente, éstos deben ofrecer sus máximos caudales, de lo que se infiere que las horas de trabajo en ellos durante el mes citado han de ser las mínimas.

En los otros meses del año, en cambio, al ofrecer más potencia los saltos de caudal fluyente, siendo además la carga máxima menor que la de enero, los saltos de embalse podrán trabajar con menos potencia que la prevista en enero y, por tanto, con más horas para suministrar la producción de que son susceptibles.

Consecuentemente con lo expuesto, las diferencias entre las potencias máximas determinadas y las que nos ofrecen los saltos de energía fluyente en el mes de enero, deberán ser cubiertas por los saltos de embalse directamente y a través de los saltos fluyentes de aguas abajo, por la influencia que sobre ellos ejercen en las horas de máxima demanda.

Naturalmente que los saltos de caudal fluyente, por las capacidades de sus cámaras de carga, pueden dar, durante cortos períodos del día, un 20 % más sobre la potencia media que supone el caudal medio circulado, pero este exceso no es prudente tenerlo en cuenta y más bien cabe dejarlo como margen de seguridad por si la variación de demanda sigue una tónica contraria a la supuesta.

## 12. FIJACIÓN DE LAS HORAS MÍNIMAS DE TRABAJO DIARIAS DE LOS SALTOS CON EMBALSE Y DE LOS CAUDALES MÁXIMOS DE TODOS LOS APROVECHAMIENTOS

Habida cuenta de las consideraciones anteriores y con la atención puesta en la influencia que ejercen los regímenes de trabajo diarios de los embalses sobre los aprovechamientos ulteriores de caudal fluyente, después de diversos tanteos, se ha fijado el número de horas mínimas de trabajo diario correspondiente al mes de enero en los lagos y embalses que se indican a continuación, aun cuando con el fin de obtener valores redondeados para los caudales o potencias resultantes, han debido modificarse luego, ligeramente, algunas de las horas establecidas, por agregación o descuento de pequeñas fracciones de las mismas:

NEGRO ....	6,5 h. (equivalente a 8 h. en días laborables, y en sábados y 0 en días festivos).
CALDAS ...	10,5 h. (13,30 h. labor., 7 h. sábados y 0 h. festivos)
BICIBERRI	5,5 h. ( 7,— h. » 4 h. » y 0 h. » )
LLAUSER..	8,— h. (10,— h. » 6 h. » y 0 h. » )
ESCALES...	12,30 h. (16,— h. » 8 h. » y 0 h. » )
CANELLES	8,— h. (10,— h. » 5 h. » y 0 h. » )
STA. ANA.	24,— h.

Establecidas las horas mínimas de trabajo resulta ya fácil determinar los caudales máximos en los saltos de lagos y embalses, aun cuando en este caso hay que estimar sus particularidades propias.

Para fijar el caudal máximo de las centrales de lagos se tiene en cuenta la necesidad de dejar en forma permanente en la tubería un caudal circulante del 10 % del caudal máximo, a fin de evitar que pueda helarse el agua en la tubería, dada la altitud de la zona de su emplazamiento.

En cuanto al régimen y caudal máximo de Escalles ha debido tenerse en cuenta la limitación que supone el contraembalse subsiguiente y el régimen de trabajo que cabe establecer para Pont de Montañana, o la de Guardia en el caso de trasvase.

En lo que se refiere a Santa Ana, dado el carácter de pantano para regantes, ha debido establecerse el régimen de caudal continuo durante las 24 horas.

Determinados los regímenes de trabajo diarios de los embalses se calculan las respectivas repercusiones en los saltos de caudal fluyente influídos, y de esta forma se obtienen los caudales máximos a que se llega en ellos.

En el cuadro resumen de potencias, producciones y presupuestos, se indican los caudales máximos determinados y las máximas potencias disponibles e instaladas en los distintos aprovechamientos.

## CAPÍTULO VIII

### PRESUPUESTOS DE LOS APROVECHAMIENTOS ADOPTADOS Y COSTES UNITARIOS.

#### 1. IDEAS QUE HAN IMPERADO EN EL CÁLCULO DE LOS PRESUPUESTOS

La fijación de los precios unitarios de las diversas unidades de obra, cuya aplicación ha servido para obtener los presupuestos de movimientos de tierras y obras de fábrica, se ha realizado aprovechando los



datos adquiridos y experimentos hechos en el curso de las obras emprendidas o ejecutadas hasta la fecha. A los efectos de transporte de los materiales y rendimiento de la mano de obra se han diferenciado dichos costes unitarios, según las zonas en que se hallasen las obras que se habían de presuponer.

Por existir proyectos totalmente redactados de los saltos de Senet, Bono, Vilaller y Escales, cuyos datos de cubitaciones se poseen exactamente, han sido aplicados a ellos los precios unitarios deducidos.

Existen además diversos estudios, anteproyectos o proyectos en curso de redacción, de los que se han aprovechado las cubitaciones y datos obtenidos, para, una vez aplicados los precios unitarios, deducir el coste de diversas instalaciones.

De todos los datos anteriormente aludidos, convenientemente comparados y relacionados entre sí, han podido deducirse ciertas leyes o relaciones que permiten obtener con suficiente aproximación los presupuestos de diversas instalaciones de las que no poseemos otros elementos de juicio.

Por lo que se refiere a los presupuestos de las máquinas y equipos de los saltos, se ha considerado, en los casos en que el pedido de aquéllos está efectuado en firme, los precios establecidos en los contratos. Para los otros casos se han utilizado, bien los datos de precios obtenidos de algunas ofertas preliminares solicitadas a algún constructor, o bien a base de deducir el precio por ciertas relaciones o leyes aproximadas, que han podido establecerse a base de las máquinas o equipos de coste conocido y de análogas características a los de aquellos cuyo precio se buscaba.

El precio de adquisición, de pedido, oferta o deducido se aumenta en un tanto por ciento (15 al 20 %) en concepto de transporte, aduanas y montaje.

Al presupuesto de ejecución material de movimiento de tierras y obras de fábrica deducido, en la forma anteriormente descrita para cada salto, añadimos un 20 % en concepto de gastos de dirección, administración, reconocimientos previos, trabajos topográficos, estudios, sondeos, redacción de proyectos, etcétera, así como aquellas obras accesorias y auxiliares de carácter circunstancial que no son recuperables al final de la obra.

Se incluyen asimismo los presupuestos totales de aquellas obras accesorias de carácter permanente, como son viviendas, residencias, escuelas, hospitales, et-

cétera, inherentes al personal de explotación en cada salto y que no han sido tenidas en cuenta en los correspondientes presupuestos de ejecución material.

Se incluye también el valor de las expropiaciones de terrenos afectados que comprende además: molinos, riegos y demás aprovechamientos existentes, edificaciones, ocupación temporal de terrenos, indemnizaciones, perjuicios, etc.

En cuanto al presupuesto de adquisición, transporte y montaje de los diversos equipos hidráulicos, eléctricos, estructuras metálicas y maquinaria en general, se añade además un 3 % o un 5 %, según se refieran a la central o al resto de las instalaciones en concepto de gastos de dirección y administración y de obras accesorias o auxiliares de carácter circunstancial no recuperables al final del montaje.

En el cuadro resumen pueden verse los presupuestos de los distintos aprovechamientos, clasificados en los conceptos de «Obras y Preliminares» y «Maquinaria y Equipo».

## 2. COSTES UNITARIOS

Para darnos mejor cuenta de las inversiones que precisa efectuar en los diferentes saltos del sistema y en el conjunto de las dos soluciones que se consideraran, sin y con trasvase, se hace preciso relacionarlas con los resultados obtenibles.

A estos efectos, si dividimos los presupuestos por el número de CV. instalados, potencia en barras 132 KV., producciones en año medio, seco y muy seco, etc., podremos obtener los costes unitarios para cada uno de los conceptos expresados.

Si bien los índices anteriores pueden orientarnos sobre la bondad de cada salto o del conjunto de ellos, los números representativos no son los que más interesa conocer, pues por una parte ha de comprenderse que muchas veces los resultados que se obtienen en los saltos no lo son por sus circunstancias específicas, sino por las repercusiones positivas o negativas de o sobre otros saltos, y, por otra parte, se ha de comprender que no solamente interesa la *cantidad* de energía, sino también la *calidad*.

Por lo que respecta a la primera de las modalidades expuestas, cabe decir que los embalses de cabecera, con o sin centrales, influyen sobre los fluyentes de aguas abajo, aumentando las producciones de estos



últimos por las retenciones de agua efectuadas con las regulaciones, cuyas aportaciones supletorias, de otro modo, no serían encauzadas en las épocas de sequía y, por consiguiente, o serían vertidas al río, o, en caso de que fueran aprovechadas en el deshielo, su valor sería escaso, habida cuenta de que se trataría de producciones consideradas como excedentes. Inversamente, los saltos fluyentes, influídos por embalses, en realidad deben imputárseles menores producciones de las que obtienen, puesto que las debidas a las regulaciones de los embalses de aguas arriba, en rigor, no les pertenecen.

Consecuentemente con lo expuesto, se calculan las producciones realmente imputables a cada salto para cada una de las dos soluciones generales adoptadas, y es de notar que para cada uno de los sistemas la suma de las producciones imputables coincide exactamente con las producciones reales, como así debe ser, en razón a que las rectificaciones recíprocas no pueden alterar la suma de los kw.-h. obtenidos.

Para que los costos unitarios por kw.-h. imputables fueran exactamente valederos, sería preciso corregir en forma análoga los presupuestos, imputando y desgravando el valor de las obras e instalaciones que se han de efectuar en los saltos influídos para permitir el beneficio de las aportaciones suplementarias, respectivamente, a los aprovechamientos causantes y a los saltos influídos. Sin embargo, como quiera que la complicación del cálculo iría en aumento y los resultados no podrían ser muy distintos, puesto que solamente interesa un nuevo índice de orientación, nos limitamos simplemente a dividir los presupuestos de las obras o instalaciones de cada aprovechamiento por los kw.-h. imputables en año y medio.

Por lo que concierne a la apreciación de la *calidad* de la energía, el problema resulta muchísimo más complejo, y si bien lo queremos dejar planteado para resolverlo matemáticamente en su día, hoy por hoy debemos contentarnos con la aceptación de una fórmula racionalmente expeditiva.

Se comprende que a la energía producible debe asignársele el valor que le corresponde por la demanda que pueda tener y, así, se comprende que la producida en época de sequía ha de ser de superior valor que la obtenible en época de deshielo o, por lo menos, bastante mayor que la de las sobreproducciones de esta época sobre los consumos normales.

Asimismo, es de asimilar que la energía de 24 horas, que, en parte, ha de ser desperdiciada si no se cuenta con otros saltos que atiendan las puntas de la demanda, ha de significar un valor menor que aquella de régimen de trabajo diario limitado o de embalses y, aun dentro de esta clase de saltos, se explica que el valor de su energía sea en parte inversamente proporcional a las horas de trabajo o directamente proporcional a los sobrecostos de las instalaciones previstas para hacer frente a dichas necesidades extraordinarias. Igualmente, el valor de un kw.-h. será menor o mayor según la seguridad que se tenga en el mantenimiento del suministro, es decir, en función de la variabilidad de las producciones según se trate de años normales, medianamente secos o muy secos.

Como se observará, la conjugación de todas estas variables y su conjunción en una fórmula matemática para reducir las producciones, según su calidad, a una sola unidad o patrón que haga homogénea la comparación de los distintos saltos, no resulta fácil, y aun cuando hemos preparado todo el estudio para que se pueda deducir y aplicar la fórmula aludida cuando ello sea posible y oportuno, de momento nos limitaremos a simplificar el problema para conseguir expeditivamente, si no la rectificación perfecta de las distintas clases obtenibles de energía y su referencia a una sola unidad, sí, al menos, un procedimiento que en el conjunto de los saltos que integran cada uno de los sistemas que se presentan, sin y con trasvase, quepa obtener índice suficientemente exacto para orientarnos sobre el coste verdadero de la energía producible, habida cuenta de sus posibilidades de colocación en el mercado normal.

Como se ha dicho en los capítulos anteriores, se ha perseguido que cada una de las soluciones generales consideradas pudiera atender a la punta máxima de demanda. Conseguido este propósito, el valor mayor o menor que se debe asignar por lo que se refiere a energía de 24 horas o de pocas horas, desaparece a los efectos de la comparación del conjunto de cada sistema y, por lo mismo, queda simplificado el problema general antes expuesto. Debemos, por tanto, atender principalmente a las posibilidades de colocar la energía durante el año, y, en segundo lugar, debemos considerar la constancia o variabilidad del suministro en el transcurso de los años.

Por lo que respecta al segundo de los puntos acaba-



dos de exponer, el coeficiente de variabilidad podemos observarlo por la relación entre las producciones de los años muy secos y la de los años medios; y por lo que respecta al primero de aquéllos, podemos referir las producciones *al valor de las que normalmente son consumibles*, para lo cual rectificaremos *virtualmente* los excedentes del deshielo —exceso de las producciones sobre los consumos normales de la demanda— afectándolos de coeficiente desvalorizador que, en principio, estimamos igual a un tercio en razón al escaso valor de dicha clase de energía.

Teniendo en cuenta que la demanda en los nueve meses del sequiaje es del 76,25 % del consumo total anual, según ya expusimos en otro Capítulo de la presente Memoria, la *producción consumible* de los aprovechamientos será la de sequiaje multiplicada por el coeficiente:

$$\frac{100}{76,25} = 1,311$$

y la diferencia entre esta rectificación y la producción total obtenible serán lo que llamamos *excedentes* y, por tanto, las *producciones virtuales* no serán otra cosa que las producciones consumibles, incrementadas con el tercio de los excedentes.

Con los costes de estos kw.-h. virtuales y los coeficientes de variabilidad de los suministros anuales, y, también, con los costes del kw.-h. de los años secos y extremadamente secos, se consigue una orientación sobre la bondad de los aprovechamientos, que junto con los otros costes unitarios y apreciación de las características y circunstancias generales, permite tener los elementos de juicio necesarios para saber donde se está y decidir en consecuencia.

En aplicación de las ideas expuestas y como resumen de los resultados obtenidos, incluimos el cuadro general citado del más alto interés.

## CAPÍTULO IX

### PROGRAMA DE TRABAJOS

#### 1. PLAZO SEÑALADO

El Decreto de 5 de abril de 1946, que concede la reserva del río, disponía que se debía presentar a la aprobación del Ministerio de Obras Públicas un plan

razonado de ordenación del conjunto de los aprovechamientos que se habían de realizar en *dos quinquenios*, lo que nos obliga a prever lo necesario para desarrollar nuestro plan de obras en forma que pueda quedar terminado, salvo causas muy justificadas, en el plazo de diez años, a contar, según nuestro entender, desde la fecha en que el Ministerio de Obras Públicas reconoció nuestra personalidad por la transferencia de los derechos y deberes, efectuada a favor nuestro, de los que incumbían al Instituto Nacional de Industria en relación a la reserva otorgada; acto administrativo que, como se ha dicho en el primer Capítulo de la presente Memoria, tuvo confirmación por la Orden Ministerial del 10 de febrero de 1949, aprobada en Consejo de Ministros de 11 del siguiente.

Por consiguiente, el plazo legal para desarrollar el plan de obras debe terminar en el año 1958.

#### Ordenación de las obras.

Aparte de las obras accesorias, tales como la Fábrica de Cemento, viviendas, parques, carreteras de acceso, etc., las cuales debían ser emprendidas urgentemente, se empezó por la ejecución de aquellos saltos más fáciles de realizar, elegidos principalmente en razón a su proximidad a carreteras existentes, porque, en esta forma, se ganaba tiempo y, entre tanto, podía desarrollarse la organización general de la Empresa.

Con esta idea se escogieron los saltos de Senet, Bono, Vilaller, Llesp y Pont de Suert, los cuales están en curso de ejecución o se hallan preparados para que se puedan terminar rápidamente.

Superada la primera etapa de los dos primeros años de nuestra existencia y vencida la carretera de Pont de Suert a Escalles, se sentó la afirmación de que convenía emprender cuanto antes la construcción del embalse de Escalles, por tratarse de obra de regulación fundamental dentro de cualquiera de los dos sistemas generales que se ponderan, sin y con trasvase, porque debía permitir la colocación de toda la energía producible en los cinco saltos anteriores y porque se hallaba cerca del centro de nuestra organización en la zona de obras, es decir, de Pont de Suert.

El plazo de terminación de los aprovechamientos de referencia se ha fijado en concordancia con la posibilidad de las fechas de entrega y montaje de los equipos.

Como cuestión de régimen interior momentáneamen-



te hemos organizado las construcciones a base de tres demarcaciones que comprenden, respectivamente, el alto Ribagorzana desde Pont de Suert, el Tor y Escales, y por tanto, sin perjuicio de ampliar más adelante el número de demarcaciones, ha de interesarnos que, las obras enmarcadas en cada una de aquéllas, se emprendan en forma que puedan ser establecidos unos ciclos lógicos en la utilización de los equipos obreros especializados y de los medios auxiliares constructivos.

Consecuencia de lo anterior, es la previsión de no comenzar, en el alto Ribagorzana, el salto de Llauset hasta que estén terminados o vencidos los de Senet, Bono, Vilaller y Pont de Suert, e igualmente la de no comenzar los ya de menos valor de Biciberri y Bacteria hasta que esté terminado el últimamente emprendido, o sea el citado del Llauset.

En el Tor, a más del salto de Llesp, se puede emprender el siguiente, llamado de Bohí; pero no sería prudente comenzar otro simultáneamente, por lo que se deja el de Caldas para ser iniciado en el año 1951, fecha en la que se podrá utilizar ya la carretera de acceso y, asimismo, se prevé no empezar el último del Tor, es decir, el del Negro, y el cale y recrecimiento de los lagos superiores, hasta que haya sido puesto en servicio el de Caldas.

Por lo que respecta a los aprovechamientos de la zona media, se estima que, como debe preverse la construcción inmediata del embalse de Santa Ana por la situación administrativa en que se encuentra la obra, debemos simultanear su construcción con la de Escales una vez se halle esta última organizada.

Naturalmente, siendo así, no podemos pensar prudentemente en emprender simultáneamente una tercera presa de la importancia de las que figuran en nuestro plan, en razón principalmente a la multiplicidad de equipos de maquinaria y de especializados que precisaríamos, y por esta causa, tanto en una solución general como en la otra (sin y con trasvase), se aplaza el comienzo de las obras del salto de Canelles hasta la terminación del de Escales.

Por eliminación queda, por fin, señalar plazos para los saltos de Pont de Montañana y La Guardia, dentro de cada uno de los sistemas a que pertenecen, obras ambas que por su importancia productiva y por sus posibilidades constructivas (permiten ser atacadas por múltiples puntos, independientes los unos de los otros), preconizamos empezarlas en este año para ser acaba-

das a fines de 1954, si se hace Pont de Montañana y un año más tarde si se opta por el salto de La Guardia.

Fijadas las fechas de iniciación de las obras, se han establecido para ellas los plazos más cortos posibles, compatibles con las necesidades constructivas específicas y posibilidades de adquisición de sus equipos. (Véase en los gráficos la ordenación de los trabajos para el desarrollo y puesta en marcha de los aprovechamientos.)

## 2. FECHA DE ENTREGA DE LAS PRODUCCIONES

De acuerdo con los programas expuestos y teniendo en cuenta las repercusiones de los embalses de cabecera sobre los saltos de agua abajo, se han determinado las fechas probables en que cabrá enviar a la red la energía producible en nuestros saltos, cuyo programa se transcribe a continuación.

Años	VALORES EN MILES DE KW.-H			
	SIN TRASVASE		CON TRASVASE	
	En el año	Acumulado	En el año	Acumulado
1951	44.116	44.116	44.116	44.116
1952	92.197	136.313	92.197	136.313
1953	74.733	211.046	74.733	211.046
1954	188.269	399.315	188.028	399.074
1955	396.272	795.587	105.657	504.731
1956	95.297	890.884	595.286	1.100.017
1957	—	890.884	—	1.100.017
1958	288.254	1.179.138	175.949	1.275.966
1959	76.412	1.255.550	65.892	1.341.858

## CAPÍTULO X

### CONSIDERACIONES FINALES Y RESUMEN GENERAL

#### 1. PRODUCCIONES TÉRMICAS COMPLEMENTARIAS

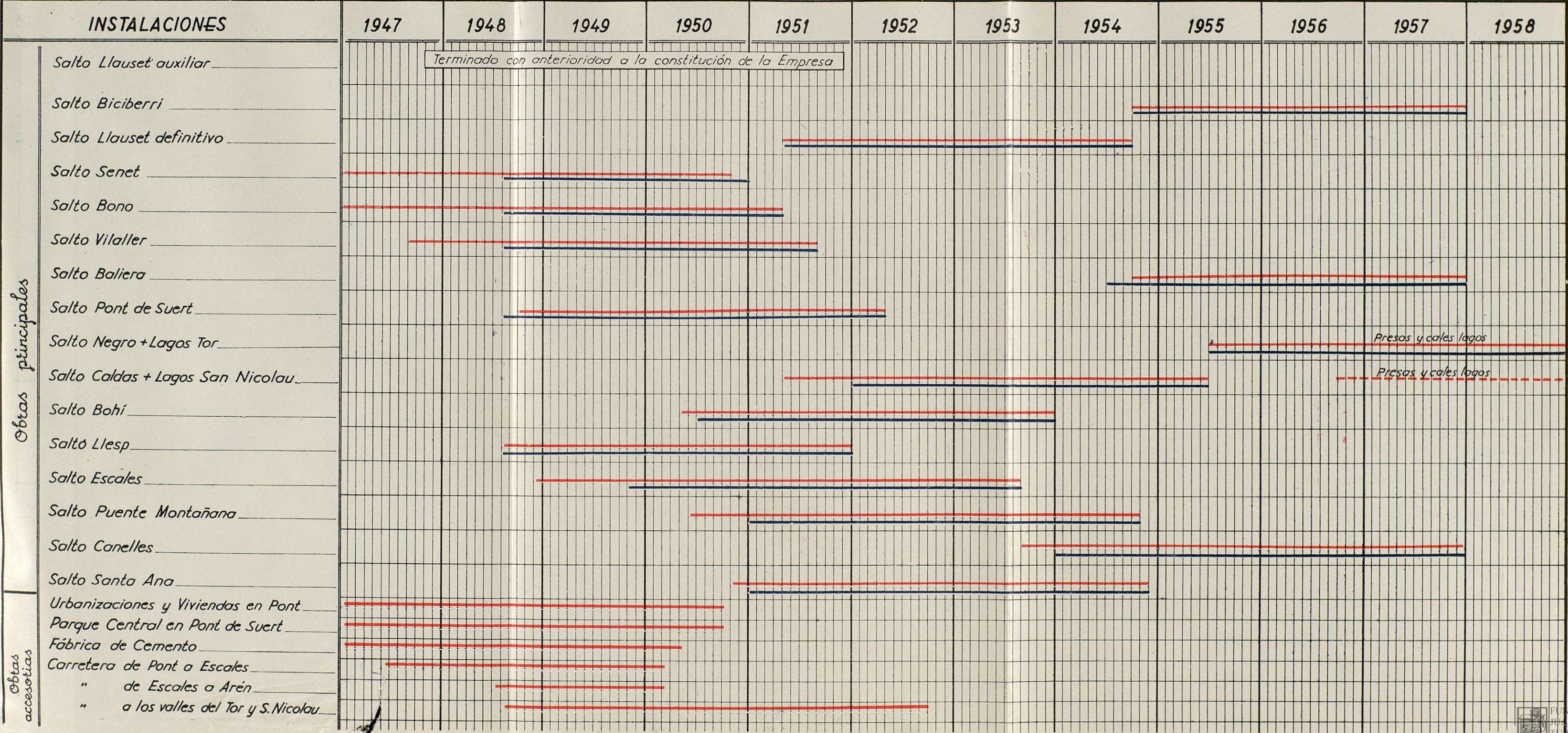
Dada la variabilidad de los índices hidráulicos anuales, en nuestro sistema, como en cualquier otro hidráulico, se hace indispensable prever suministro complementario de energía térmica, puesto que, de lo contrario, o bien no se podría contratar más que la energía producible en los años secos, si se quería que los suministros quedasen asegurados a gusto del cliente, o bien debería contratarse la totalidad de la energía producible en año y medio, sin garantía ninguna



PLAN DE ORDENACIÓN DE LOS TRABAJOS PARA EL APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA CUENCA DEL NOGUERA RIBAGORZANA

A) Solución sin trasvase

El trazo — comprende las obras principales, en su parte esencial (no detalles constructivos accesorios)  
" — — — comprende la construcción y el montaje de la maquinaria y equipo

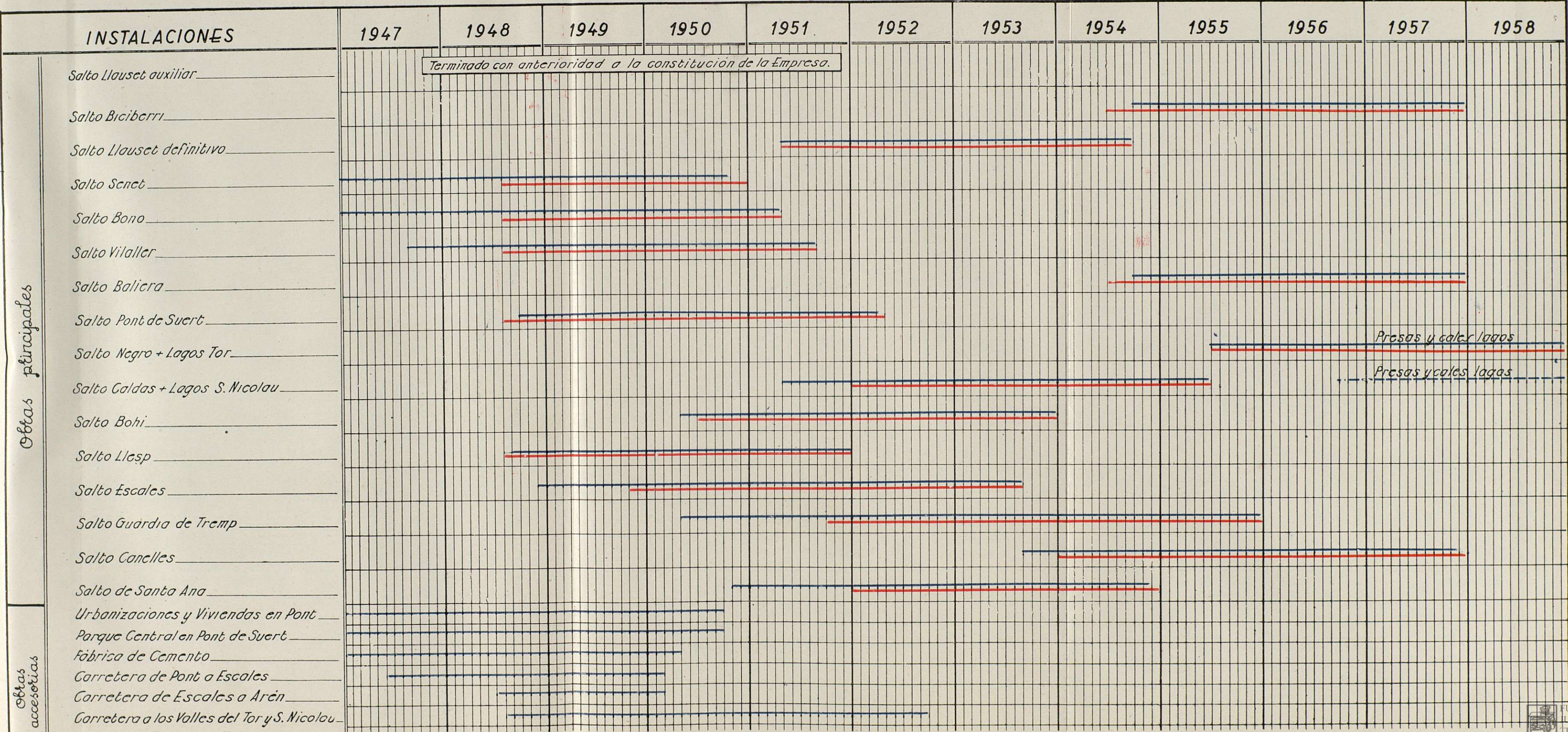




PLAN DE ORDENACIÓN DE LOS TRABAJOS PARA EL APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA CUENCA DEL NOGUERA RIBAGORZANA

B) Solución con trasvase

El trazo — comprende las obras principales, en su parte esencial (no detalles constructivos accesorios)  
El trazo — comprende la construcción y el montaje de la maquinaria y equipo.









para el cliente. Lo primero llevaría consigo el despilfarro de la energía producida normalmente sobre el límite de la de los años secos, y lo segundo acarrearía unas tarifas muy bajas, aparte de las perturbaciones no admisibles que se ocasionarían a las industrias compradoras de energía como consecuencia de la inseguridad y variabilidad de los suministros.

El sistema hidroeléctrico, objeto de la presente sistematización, resulta excepcionalmente equilibrado, puesto que, gracias a las reservas y saltos de horario limitado, es posible atender a las demandas distintas de los diferentes meses del año y, dentro de esos consumos, a las puntas máximas diarias, e incluso, merced a las reservas hiperanuales, resulta posible corregir, en cierta medida, las desigualdades de unos años respecto a los otros.

Ello no obstante, como se ha dicho, por bueno que sea un sistema hidroeléctrico, no hay manera de dominar los años secos, por lo que, con vistas a la corrección de los inconvenientes aludidos, se hace preciso rellenar el vacío de las producciones de los años secos, y se acude para ello al único procedimiento conocido hasta el presente, o sea, a las térmicas.

Afortunadamente, en nuestro caso y por las relaciones que nos unen con la Empresa «Calvo Sotelo», por nuestros comunes intereses a través del Instituto Nacional de Industria, podremos contar con el apoyo de la Central Térmica de Escatrón, en el plan de construcción inmediata, la cual quedará conectada con la red de grandes líneas eléctricas que tenemos en estudio para dar salida a nuestras producciones eléctricas.

A reserva de efectuar más adelante, en conjunción con «Calvo Sotelo», estudio más completo de cuáles pueden ser las producciones y potencias complementarias de carácter térmico, a continuación procederemos al cálculo aproximado de nuestras necesidades.

Según la concepción que tenemos de cómo han de trabajar las térmicas, estimamos que ellas no deben solamente limitarse a trabajar en los años secos, sino que, por el contrario, deben funcionar, aunque sea parcialmente, todos los años, con el fin de que las inversiones dinerarias resulten rentables, y para que, a la vez, las máquinas y los equipos de personal sea posible se hallen siempre prestos a funcionar con la mayor seguridad.

Con esta finalidad, partimos de la base que la térmica, en los años normales, deberá trabajar durante los nueve meses de sequía, por ejemplo, a una cuarta parte de su producción posible —la fracción exacta debe ser deducida económicamente, habida cuenta del coste de las instalaciones y de la cobertura del sistema hidráulico— y durante los años muy secos deberá poder suministrar los déficits de la energía hidráulica en relación con las producciones de esta clase normales, más las producciones térmicas que le atribuímos de manera permanente.

A base de lo expuesto y de los antecedentes contenidos en los anteriores Capítulos de esta Memoria, tenemos:

	Sin trasvase Miles kw.-h.	Con trasvase Miles kw.-h.
Producción hidráulica consumible durante el sequiaje en año medio ... ..	881.021	1.001.031
Producción posible en año muy seco ... ..	485.462	547.541
Déficit de energía hidráulica...	395.559	453.490
Complementos térmicos de los años normales: $\frac{1}{3}$ de los anteriores déficits ... ..	131.853	151.163
Producción hidráulica sequiaje año medio ... ..	881.021	1.001.031
Producción térmica complementaria en año medio ... ..	131.853	151.163
Producción con térmica período sequiaje ... ..	1.012.874	1.152.194
Producción consumible anual con térmicas cualquiera que sea el año (cantidades anteriores divididas por 0.7625)...	1.327.878	1.511.074
A deducir producciones hidráulicas años muy secos ... ..	651.828	742.553
Producciones máximas de carácter térmico (en años muy secos) ... ..	676.050	768.521
Potencia necesaria a base de trabajar en estos años excepcionales 8.500 horas aproximadamente ... ..	80.000 kw.	90.000 kw.

Veamos ahora si en estas producciones poseemos potencias suficientes para hacer frente a las máximas puntas de la demanda.



	Sin trasvase	Con trasvase
Punta máxima demanda con el consumo anual previsto con térmica.	314.000 kw.	357.000 kw.
Disponible hidráulico en el momento máxima punta demanda año medio ... ..	272.900 kw.	310.100 kw.
Punta necesaria térmica en año medio ... ..	41.100 kw.	46.900 kw.
Disponible hidráulico en el momento de la máxima punta de demanda, en año muy seco ... ..	250.770 kw.	291.630 kw.
Punta necesaria térmica en año muy seco ... ..	63.230 kw.	65.370 kw.

O sea, que precisamos, para las puntas, menos de la potencia térmica que debemos instalar para obtener las producciones térmicas complementarias.

Con las hipótesis efectuadas todavía tenemos las siguientes cifras indicativas.

	Sin trasvase	Con trasvase
Excedentes hidráulicos año medio a añadir a las producciones consumibles con térmica ... .. kw.-h.	58.958.000	13.054.000
Producciones virtuales vendibles en año medio ...	1.347.530.000	1.515.425.000
Horas de trabajo al año en la térmica durante los años medios ... ..	1.680 horas	1.680 horas
Complemento térmico en año seco ... .. kw.-h.	420.522.000	502.299.000

Calculamos, finalmente, en la forma aproximada que cabe hacerlo, los complementos térmicos anuales que como media anual se harían preciso de darse la variación definida por los índices hidráulicos observados durante el período de los 34 años en que hemos basado el estudio hidráulico.

Como se recordará, se acusó la siguiente distribución:

Años extremadamente húmedos con índice hidráulico superior a 1,20 ... ..	5 años
Años medios con índices hidráulicos comprendidos entre 1,20 y 0,80 ... ..	22 »
Años secos con índice hidráulico comprendido entre 0,80 y 0,66 ... ..	5 »
Años extremadamente secos con índice hidráulico comprendido entre 0,66 y 0,33 ... ..	2 »
SUMA ... ..	34 años

Si se acepta que los años considerados como medios quedan compensados, los de índice hidráulico comprendido entre 1,00 y 0,80 con los de 1,00 y 1,20, multiplicando los números anteriores por los respectivos consumos térmicos previstos, tendremos:

	Sin trasvase Millones kw.-h.	Con trasvase Millones kw.-h.
Consumo térmico años extremadamente húmedos ... ..	$5 \times 0 = 0$	$5 \times 0 = 0$
Consumos térmicos años medios ... ..	$22 \times 131,8 = 2900$	$22 \times 151,1 = 3324$
Consumos térmicos años secos ... ..	$5 \times 420,5 = 2103$	$5 \times 502,3 = 2511$
Consumos térmicos años extremadamente secos ... ..	$2 \times 676,0 = 1350$	$2 \times 768,5 = 1537$
SUMAS ... ..	6355	7372
Media anual ... ..	$\frac{6355}{34} = 187,000$	$\frac{7372}{34} = 216,800$

Porcentaje complemento térmico en relación producción consumible con térmica.

14,1 %

14,3 %

## 2. INFLUENCIAS DE LA SOLUCIÓN POR TRASVASE SOBRE LOS APROVECHAMIENTOS DE OTRAS CUENCAS

Es de convenir que a los aprovechamientos de las cuencas afectadas por el trasvase no se les ocasiona ningún perjuicio, sino que, por el contrario, se les aumentan sus posibilidades al ensanchárseles los recursos hidráulicos que explotan con unas aportaciones de calidad, que les mejoran las suyas propias en los períodos de los nueve meses de sequía y en los años secos y muy secos.

De los 201,6 millones de kw.-h. susceptibles de producirse en año medio como incremento en las instalaciones de los ríos que se benefician de las aportaciones del trasvase, 180 millones corresponden al período de sequía, lo que quiere decir que pueden servir de base para consumir durante el año 236,0 millones, y absorber, por consiguiente, no sólo la totalidad de las producciones del período de deshielo que pueden producir las aguas trasvasadas, sino que, además, podrán compensar o colocar 34,4 millones de los propios excedentes que se tengan en los otros sistemas.



CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES Y POSIBILIDADES DE PRODUCCION DE LOS APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRICOS DE LA CUENCA DEL RIBAGORZANA

APROVECHAMIENTOS		Tipo de Aprovechamiento	SUPERFICIE CUENCA AFLUENTE Km²	ALTURA MEDIA m	CAUDAL ESPECIFICO AÑO MEDIO l/seg./Km²	CAUDAL MEDIO AÑO MEDIO Qs	APORTACIONES			RESERVAS				RESERVAS EN 10 <sup>6</sup> kWh TOTALES	NIVELES AGUA		SALTO BRUTO Medio (Año medio) m	PRODUCCIONES									REGIMEN DE TRABAJO EN MES DE ENERO			CAPACIDAD		INSTALACIONES					
							Año Medio 10 <sup>6</sup> m³	Año Seco 1980-29 10 <sup>6</sup> m³	Año Muy seco 1948-49 10 <sup>6</sup> m³	Anuales 10 <sup>6</sup> m³	Hiper-anuales 10 <sup>6</sup> m³	Super-reservas 10 <sup>6</sup> m³	TOTALES 10 <sup>6</sup> m³		Toma m	Cámara o chimenea equilibrio a pleno cargo m		Desagüe central a pleno cargo m	Maximo y minimo m	EN AÑO MEDIO			EN AÑO SECO			EN AÑO MUY SECO			Horas medias diarias de trabajo	Caudales máximos m³/seg	Potencias máximas disponibles kW (4)	Caudal m³/seg	Nº tipo y r.p.m. de los grupos	POTENCIA INSTALADA			
																				Seguaje 10 <sup>6</sup> kWh	Deshielo 10 <sup>6</sup> kWh	TOTAL 10 <sup>6</sup> kWh	Seguaje 10 <sup>6</sup> kWh	Deshielo 10 <sup>6</sup> kWh	TOTAL 10 <sup>6</sup> kWh	Seguaje 10 <sup>6</sup> kWh	Deshielo 10 <sup>6</sup> kWh	TOTAL 10 <sup>6</sup> kWh						en turbinas CV	En alternadores kW	kVA	en bagres 132 kW
ZONAS DEL TOR Y ALTA DEL RIBAGORZANA	LAGOS S. NICOLAU		12,1	2.470	54,1	0,655	20,668	14,157	8,799	4,912	4,288	—	9,200	A) 24.930 B) 26.940	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	NEGRO	Galería forz. y emb. <sup>re</sup> regul.	15,4	2.471	54,5	0,839	26,465	19,504	11,203	6,815	6,185	—	13,000	A) 45.438 B) 48.278	~ 2.167 ~ 2.117	2.163.73 2.113.73	1.761.73	402.352	385	15.490	5.285	20.775	11.461	6.277	17.738	9.975	3.675	13.650	6,5	3,5	9.920	3,5	1 doble Pelton hor. 600	15.900	11.200	14.000	10.800
	CALDAS { Toma S. Esprit Lago Caballers	" " " "	43,0	2.358	48,5	2,084	65,722	46,586	27,878	—	—	—	—	~ 1.758 ~ 1.748 ~ 1.713	~ 1.758 ~ 1.737.30 ~ 1.702.30	1.290.30	447.412	435	63.204	34.000	97.204	43.877	29.866	73.743	37.836	13.287	51.123	10,5	8,0	25.610	8,0	2 Pelton hor. 600	40.000	28.600	35.800	27.500	
	BOHI	Canal con caudal fluyente	175,0	2.199	40,8	7,141	225,197	158,026	91,625	—	—	—	—	~ 1.289 ~ 1.289	~ 1.289 ~ 1.283.80	1.094.80	—	189	51.603	27.171	78.774	33.036	24.681	57.717	26.335	13.170	39.505	—	9,7	13.530	10,0	2 Francis hor. 750	21.600	15.300	19.100	14.700	
	LLESP	Canal part. emb. modul.	208,7	2.128	37,9	7,913	249,540	174,238	99,804	—	—	—	(0,150)	—	1.079.47	1.075.74	929.62	—	146.12	44.242	22.539	66.781	27.965	20.486	48.451	21.864	11.072	32.936	—	10,3	11.040	10,5	2 Francis vert. 750	17.600	12.400	15.500	11.900
	TOTAL CUENCA TOR									16,984	10,716	—	27.700	A) 85.272 B) 91.323	—	—	—	—	—	174.539	88.995	263.534	116.339	81.310	197.649	96.010	41.204	137.214	—	—	60.100	—		95.100	67.500	84.400	64.900
	BICIBERRI	Galería forz. y emb. <sup>re</sup> regul.	7,2	2.400	50,6	0,364	11,481	8,153	4,937	1,176	0,324	—	1,500	A) 4.732 B) 5.060	~ 1.970 ~ 1.950	1.969.25 1.949.25	1.349.55	679.70 599.70	613	8.515	5.788	14.363	5.127	4.675	10.402	4.856	1.725	6.581	5,5	1,0	4.510	1,0	1 Pelton hor. 750	7.000	4.900	6.100	4.700
	LLAUSET { Toma L. Llauset Toma Salencas R. Bueno	" " " "	8,9	2.555	59,3	0,522	16,642	11,879	7,554	5,919	4,081	—	10,000	A) 35.453 B) 37.637	~ 2.173 ~ 2.130	2.169.45 2.123.75	1.349.55	819.90 744.20	804.50	37.295	20.102	57.397	26.433	17.889	44.322	23.637	9.114	32.751	8,0	2,8	16.580	2,8	1 doble Pelton h. 600	26.000	18.600	23.300	17.900
	SENET { Toma Llauset Toma Ribagorzana	Canal pl. caudal fluyente	176	2.027	34,4	0,605	19,080	13,173	7,525	—	—	—	—	1.311.50 1.310.81	1.306.43	1.089.17	—	217.26	33.499	18.121	51.620	21.041	16.688	37.729	16.642	9.468	26.110	—	5,0	8.000	5,0	2 Francis vert. 1000	12.200	8.600	10.800	8.300	
	BONO	" " " "	100,5	2.240	42,6	4,282	135,084	95,051	55,452	—	—	—	—	1.089.17	1.083.97	1.002.25	—	81.72	12.763	6.933	19.696	8.021	6.392	14.413	6.342	3.655	9.997	—	6,0	3.020	6,0	2 Francis vert. 1000	5.500	3.800	4.700	3.700	
	VILALLER	" " " "	146,6	2.063	35,6	5,216	164,490	113,979	65,005	—	—	—	—	1.002.05	997.51	921.34	—	76.17	14.773	7.698	22.471	9.025	6.983	16.008	6.862	3.897	10.759	—	7,0	3.230	7,0	2 Francis vert. 750	6.100	4.300	5.400	4.100	
	BALIERA	" " " "	41,5	2.070	35,8	1,486	46,875	32,495	18,611	—	—	—	—	~ 1.346 ~ 1.346	1.337.44	921.34	—	416.10	19.839	10.315	30.154	12.283	9.360	21.643	9.019	5.757	14.776	—	0,7	2.090	1,5	1 Pelton hor. 750	6.800	4.800	5.000	4.600	
	TOTAL CUENCA ALTO RIBAG.									7,095	4,405	—	11.500	A) 40.185 B) 42.697	—	—	—	—	—	126.744	68.957	195.701	82.530	61.987	144.517	67.358	33.616	100.974	—	—	37.430	—		63.600	45.000	56.300	43.300
	PONT DE SUERT { T. Bal. y Ribagor. Tor	Canales pl. caudal fluyente	283,6 239,3	1.840 2.060	29,1 35,4	8,263 8,472	260,580 267,174	176,145 185,034	96,938 106,114	—	—	—	—	—	921.40 921.00	914.18	823.60	—	90.58	57.616	29.291	86.907	35.062	26.389	61.451	26.314	14.049	40.363	—	11,0 9,5	12.180	21,0	2 Francis vert. 500	22.100	15.600	19.500	15.000
	TOTAL ZONA ALTA									24,079	15,121	—	39.200	A) 125.457 B) 134.020	—	—	—	—	—	358.899	187.243	546.142	233.931	169.686	403.617	189.682	88.869	278.551	—	—	109.710	—		180.800	128.200	160.400	123.200
ZONA MEDIA RIBAGOR. Solución A	ESCALES	Salto pie presa y emb. regul.	731,2	1.750	27,2	19,857	626.392	421.507	225.452	64.500	54.837	—	119.337	~ 818.50 ~ 768.50	~ 818.50 ~ 768.50	~ 704.50	114.64	102.94	90.411	41.040	131.511	59.403	35.683	95.086	47.567	14.055	61.622	12,5	36,0	26.050	39,0	3 Francis vert. 500	50.400	36.000	45.000	34.600	
	PONT DE MONTAÑANA	Canal part. emb. <sup>re</sup> modul.	733,0	1.750	27,2	19,940	627.933	423.246	226.014	—	—	—	(0,600)	~ 698 ~ 698	~ 684.18	~ 504.78	179.40	179.40	160.983	68.276	229.259	104.378	62.696	167.074	81.785	26.335	108.120	16	18,7	34.330	26,0	2 Francis vert. 500	53.200	37.600	47.000	36.000	
	CANELLES	Salto pie presa y emb. regul.	1.628,2	1.263	18,4	29,998	946.012	623.071	277.999	120.982	139.523	59.495	320.000	~ 502.00 ~ 472.00	~ 502.00 ~ 472.00	~ 376	126.96	120.59	176.918	56.094	233.072	123.649	60.189	183.838	106.412	23.698	130.110	8,2	94,9	83.200	98,0	3 Francis vert. 300	141.500	99.980	124.900	95.980	
	SANTA ANA	" " " "	1.757,5	1.218	17,8	31,282	986.505	648.251	287.374	15.318	17.666	109.116	142.100	~ 375.00 ~ 347.00	~ 375.00 ~ 347.00	~ 305	70.42	64.71	93.690	21.876	115.566	70.991	23.127	94.118	60.016	13.409	73.425	24	41,7	19.610	45,0	2 Francis vert. 375	36.000	25.400	31.800	24.400	
	TOTAL ZONA MEDIA SOL. A									200,800	212,026	168,611	581,437	253.569	—	—	—	—	—	522.122	187.286	709.408	358.421	181.695	540.116	295.780	77.497	373.277	—	—	163.190	—		281.100	198.980	248.700	190.980
ZONA MEDIA DEL RIBAGORZANA Solución B	ESCALES	Salto pie presa y emb. regul.	731,2	1.750	27,2	19,857	626.392	421.507	225.452	64.500	54.837	—	119.337	~ 818.50 ~ 768.50	~ 818.50 ~ 768.50	~ 704.50	114.64	102.45	90.337	40.845	131.182	59.415	35.683	95.098	47.567	14.055	61.622	12,5	36,0	25.970	39,0	3 Francis vert. 500	50.400	36.000	45.000	34.600	
	GUARDIA	Canal part. emb. <sup>re</sup> modul.					15.590 <sup>(3)</sup>	491.648 <sup>(3)</sup>	332.831 <sup>(3)</sup>	225.452 <sup>(3)</sup>	—	—	—	~ 698 ~ 698	~ 678.60	376.60	—	302	270.949	31.909	302.858	175.676	46.362	222.038	137.650	44.323	181.973	17	19,4								



RESUMEN DE POTENCIAS PRODUCCIONES PRESUPUESTOS Y COSTES UNITARIOS  
RESULTANTES PARA LOS APROVECHAMIENTOS PREVISTOS EN LA CUENCA DEL N. RIBAGORZANA

APROVECHAMIENTOS		Características de los aprovechamientos			Producciones anuales en miles de KWh						Presupuestos			Costes relativos por CV en turbinas			Costes resultantes por unidad de energía anual Pesetas por KWh					
		Caudal m³/seg	Salto bruto máximo a plena carga m.	Potencia en turbinas CV	Posibles	Año medio		Virtuales	Año seco tipo	Año muy seco tipo	Obras y preliminares miles de Ptas.	Maquin.º equipo, comp.º y tub.º	Total miles de Ptas.	Obras y preliminares	Maquin.º equipo compuertas y tuberías	Total Pesetas	Posibles	Año medio		Virtuales	Año seco	Año muy seco
						Imputables																
						Sin trasvase	Contrasvase															
																		0.41	0.49			
Zonas del Tor y alto del Ribagorzana	Lagos Bohi (Tor y S.Nicolau) (Embalse útil 28x10⁶m³)	—	—	—	—	50070	41337	—	—	—	9.446	10.920	20.376	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Salto del Negro	3.50	402.00	15.900	20.775	26342	24555	20.463	17.738	13.650	14.424	20.979	35.403	910	1320	2230	1.70	1.34	1.44	1.73	2.00	2.59
	Salto de Caldas	8.00	447.00	40.000	97.204	96777	92061	87.641	73.743	51.123	47.295	42.044	89.339	1180	1050	2230	0.92	0.92	0.97	1.02	1.21	1.75
	Salto de Bohi	10.00	189.00	21.600	78.774	65053	65053	71.360	57.717	39.505	16.271	24.960	41.231	750	1160	1910	0.52	0.63	0.63	0.58	0.71	1.04
	Salto de Llesp	10.50	146.12	17.600	66.781	56032	56032	60.928	48.451	32.936	16.701	22.219	38.920	950	1260	2210	0.58	0.69	0.69	0.64	0.80	1.18
	Total cuenca Tor	—	—	95.100	263.534	294.274	279038	240.392	197.649	137.214	104.137	121.122	225.259	1100	1270	2370	0.85	0.77	0.81	0.94	1.14	1.64
	Salto del Biciberrí (Embalse útil 1,5x10⁶m³)	1.00	619.70	7.000	14.363	18730	17676	12.282	10.402	6.581	16.337	12.598	28.935	2330	1800	4130	2.01	1.54	1.64	2.36	2.78	4.40
	Salto del Llauset (Embalse útil 10x10⁶m³)	2.80	819.70	26.000	57.397	79377	74066	51.728	44.322	32.751	33.472	38.765	72.237	1290	1490	2780	1.26	0.91	0.98	1.40	1.63	2.21
	Salto de Senet	5.00	217.26	12.200	51.620	44116	44116	46.485	37.729	26.110	12.220	17.472	29.692	1000	1430	2430	0.58	0.67	0.67	0.64	0.79	1.14
	Salto de Bono	6.00	81.72	5.500	19.696	16821	16821	17.720	14.413	9.997	8.682	7.091	15.773	1580	1290	2870	0.80	0.94	0.94	0.89	1.09	1.58
	Salto de Vilaller	7.00	76.17	6.100	22.471	19344	19344	20.403	16.008	10.759	8.558	11.030	19.588	1400	1810	3210	0.87	1.01	1.01	0.96	1.22	1.82
	Salto del Baliera	1.50	416.10	6.800	30.154	30154	30154	27.390	21.643	14.776	16.220	13.157	29.377	2390	1930	4320	0.97	0.97	0.97	1.07	1.36	1.99
	Total cuenca alto Ribagorzana	—	—	63.600	195.701	208542	202.177	176.008	144.517	100.974	95.489	100.113	195.602	1500	1570	3070	1.00	0.94	0.97	1.11	1.35	1.94
	Salto de Pont de Suert	21.00	90.58	22.100	86.907	74733	74733	79.325	61.451	40.363	32.617	42.113	74.730	1480	1910	3390	0.86	1.00	1.00	0.94	1.22	1.85
Total Zona Alta	—	—	180.800	546.142	577549	555.948	495.725	403.617	278.551	232.243	263.348	495.591	1280	1460	2740	0.91	0.86	0.89	1.00	1.23	1.78	
Zona aguas abajo Sopena Sol. sin trasvase	Salto de Escalles (Embalse útil 119x10⁶m³)	39.00	114.00	50.400	131.511(A) 131.182(B)	185128	127260	122.908(A) 122.682(B)	95.086(A) 95.098(B)	61.622(A) 61.622(B)	97.557	58.598	156.155	1940	1160	3100	1.19	0.84	1.23	1.27	1.64	2.53
	Salto de Pont de Montañana	26.00	179.40	53.200	229.259	176.448	—	217.119	167.074	108.120	116.517	63.546	180.063	2190	1190	3380	0.79	1.02	—	0.83	1.08	1.67
	Salto de Canelles (Embalse útil 320x10⁶m³)	98.00	126.00	141.500	233.072	218061	—	232.369	183.838	130.110	85.423	121.713	207.136	600	860	1460	0.89	0.95	—	0.89	1.13	1.59
	Salto de Santa Ana (Embalse útil 142x10⁶m³)	45.00	70.00	36.000	115.566	98364	—	120.407	94.118	73.425	28.924	51.002	79.926	800	1420	2220	0.69	0.81	—	0.66	0.85	1.09
	Total Zona aguas abajo Sopena solución sin trasvase	—	—	230.700	577.897	492873	—	569.895	445.030	311.655	230.864	236.261	467.125	1000	1020	2020	0.81	0.95	—	0.82	1.05	1.50
Zona aguas abajo Sopena Sol. con trasvase	Salto de Guardia	26.00	302.00	90.000	302.858	—	498547	337762	222.038	181.973	159.471	91.478	250.949	1770	1020	2790	0.83 } 0.71	—	0.72	0.74 } 0.64	1.13 } 0.97	1.38 } 1.18
	Ampliación Saltos en otras cuencas	26.00	205.00	78.000	201.573	—	—	224.804	147.787	121.118	17.165	90.963	108.128	220	1166	1386	0.54	—		0.48	0.73	0.89
	Salto de Canelles (Embalse útil 320x10⁶m³)	68.00	126.00	98.100	112.617	—	128119	98.170	96.387	60.070	84.668	94.092	178.760	860	960	1820	1.59	—	1.40	1.82	1.85	2.98
	Salto de Santa Ana (Embalse útil 142x10⁶m³)	16.00	70.00	12.700	47.486	—	31984	43.044	43.828	39.219	28.097	26.950	55.047	2210	2120	4330	1.16	—	1.72	1.28	1.26	1.40
	Total Zona aguas abajo Sopena solución con trasvase	—	—	278.800	664534	—	658650	703780	510040	402.380	289.401	303.483	592.884	1038	1088	2126	0.89	—	0.90	0.84	1.16	1.47

T O T A L E S

TOTAL GENERAL SOLUCION SIN TRASVASE (A)	461.900	1255.550	1255.550	1188.528	943.733	651.828	560.664	558.207	1118.871	1210	1210	2420	0.891	0.891	0.941	1.186	1.717
TOTAL GENERAL SOLUCION CON TRASVASE (B) <small>SOLO SALTOS ENHER ENHER Y OTRAS CUENCAS</small>	510.000	1140.285 1341.858	1341.858	1322.187	860.968 1008.755	621.435 742.553	619.201	625.429	1244.630	1214	1226	2440	0.928	0.928	0.941	1.234	1.676







Análogamente, en los años muy secos, la variabilidad de las producciones por las aguas trasvasadas en relación a las del año medio resulta ser del 0,60, cuando las generales que nosotros obtenemos son del 0,55 con trasvase, y 0,524, sin trasvase.

Todo ello sin perjuicio de las ventajas que se pueden conseguir en la explotación de los embalses con las retenciones de las aportaciones trasvasadas.

Por otra parte, el uso de los caudales trasvasados no ha de significar para algunos de los saltos construídos ningún gasto, para otros solamente la instalación de algunos nuevos grupos, y para los que se han de construir, simplemente la ampliación de las secciones de canales y de los equipos.

### RESUMEN GENERAL

A manera de resumen, finalizamos este trabajo con los cuadros que se unen al texto de esta Memoria, expresivos, el primero, de las características técnicas de la cuenca y de los aprovechamientos definitivamente previstos, agrupadas en las dos soluciones generales que hemos venido estimando, sin y con trasvase; y el segundo, de los presupuestos de los saltos con los costes unitarios considerados.

Como resultados más principales interesa destacar los siguientes:

	Solución sin trasvase	Solución con trasvase
Potencia instalada CV. ... ..	461.900	510.000
Producción año medio sequiaje 10 <sup>6</sup> kw.-h. ... ..	881,0	1.001,0
Producción año medio deshielo 10 <sup>6</sup> kw.-h. ... ..	374,5	340,8
Producción año medio total ... ..	1.255,6	1.341,8
Producciones consumibles año medio 10 <sup>6</sup> kw.-h. ... ..	1.155,5	1.312,8
Excedentes deshielo año medio 10 <sup>6</sup> kw.-h. ... ..	100,1	29,0
Producción virtual año medio (apre- ciando calidad de la energía) 10 <sup>6</sup> kw.-h. ... ..	1.188,9	1.322,5
Producción año muy seco, valor ab- soluta 10 <sup>6</sup> kw.-h. ... ..	651,8	742,6
Producción año muy seco, valor rela- tivo respecto año medio ... ..	0,519	0,553
Consumos asegurables cualquier año con un complemento medio de energía térmica del orden del 14 ÷ 15 % 10 <sup>6</sup> kw.-h. ... ..	1.327,9	1.511,1
Punta máxima comprometible de ca- rácter hidráulico kw. ... ..	272.900	310.100
Id., id., con térmica kw. ... ..	314.000	357.000
Capacidad útil de los embalses con- jugados 10 <sup>6</sup> m. <sup>3</sup> ... ..	620	825
Presupuesto 10 <sup>6</sup> ptas. ... ..	1.118,9	1.244,6
Inversión por CV. instalado ... ..	2.420	2.440
Inversión por kw.-h. año medio ... ..	0,891	0,928
Id., id., año seco ... ..	1,186	1,234
Inversión por kw.-h. año muy seco ... ..	1,717	1,676
Id., id., virtual año medio ... ..	0,941	0,941
Plazo previsto para la entrega del grueso de la producción hidráulica (más de mil millones) de kw.-h.)	Año 1957	Año 1955

Mayo 1950.

*Finalizada por el Sr. Miret, la exposición resumida del anterior trabajo y agotado el temario que figuraba en el orden del día, el Presidente levanta la sesión a las dieciocho horas.*







SECCIÓN 2.<sup>a</sup>







II CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA

(28 de mayo a 3 de junio de 1950)

ACTA DE LA SESIÓN CELEBRADA EL DÍA 29 DE MAYO DE 1950

*Comienza la sesión a las cuatro de la tarde. Se constituye a continuación la Mesa, bajo la presidencia de D. José María Oriol y Urquijo, Ingeniero Industrial, y actúan como Vicepresidentes D. Angel Torres Ossorio, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, y D. Manuel Fernández Campos, Ingeniero Industrial. Es Secretario de la Sección D. Prudencio Fernández Pello, Ingeniero Industrial.*

*El Presidente, después de saludar a los reunidos, concede la palabra al señor Alvarez (D. Saturnino), para leer, seguidamente, su trabajo, titulado:*

N.º 21. - España debe ampliar algunas de sus térmicas  
mediante el ciclo binario de mercurio

Autor: D. SATURNINO ÁLVAREZ SÁNCHEZ

Ingeniero Industrial

1. A MANERA DE EXORCIO

La imperiosa necesidad de aumentar continuamente la potencia eléctrica de nuestras centrales, si queremos, realmente, vencer la crisis actual, prosiguiendo la industrialización del país, y el hecho de ser España el primer productor mundial de mercurio, lo que debe llevar aparejado el más completo conocimiento en el campo de sus aplicaciones, me han inducido a la preparación de este modesto trabajo, que, por otra parte, viene también a completar otro anterior: «LAS ALTAS PRESIONES Y TEMPERATURAS EN LAS APLICACIONES TERMODINÁMI-

CAS» (1), en el cual planteé con bastante amplitud el problema de la renovación de nuestras centrales térmicas, tomando como base la moderna técnica de las altas presiones y temperaturas, tan largamente desarrollada y empleada en el extranjero, particularmente en los Estados Unidos de Norteamérica, según pude comprobar y estudiar con detalle durante mis viajes a dicho país en los veranos de 1946 y 1947.

Pues bien, estos generadores de dos clases de fluido, utilizados con buen éxito en la producción de

(1) Primer premio de los trabajos de libre elección de las Primeras Jornadas de Ingeniería Industrial, celebradas en Barcelona en junio de 1948.



energía eléctrica, y, en particular, los de vapor de mercurio y agua, que llevan unido notable ahorro de energía calorífica mejoran incluso los consumos de las instalaciones de altísima presión, permiten, además, renovar las antiguas centrales de vapor ampliando notablemente la potencia instalada sin necesidad de aumentar el caudal de agua de sus circuitos de refrigeración.

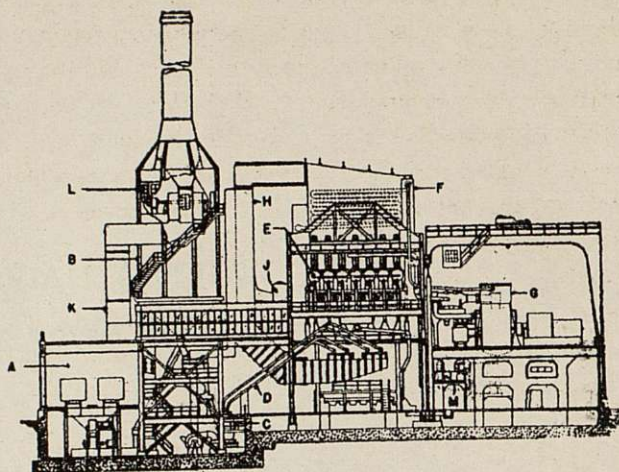
Todo lo anterior nos hace pensar, inmediatamente, en el deber que tiene nuestro país de modernizar algunas de sus centrales mediante el ciclo de vapor de mercurio, idea esta que debería contar con el alto patrocinio del Consejo de Administración de las Minas de Almadén y Arrayanes, para su desarrollo, pues este nuevo mercado nos permitiría mantener una producción (1) más elevada de dicho metal, lo que repercutiría favorablemente en el mantenimiento de un precio alto en el comercio internacional con beneficios para nuestra balanza de pagos, sobre todo, si las centrales que ampliásemos con el ciclo de mercurio exhibiesen y divulgasen sus ventajas con fines, en cierto modo, propagandísticos, lo que nos lleva a fijarnos acto seguido en las dos térmicas emplazadas en la capital de España, donde el precio del combustible es alto, el agua de refrigeración escasa y la falta de energía eléctrica notoria, si bien, como veremos en el terreno económico, no hay, prácticamente, limitaciones en nuestro país en cuanto a su lugar de emplazamiento.

Pero, antes de concretar algo más este último extremo, vamos a recorrer someramente el camino seguido en teoría y en la práctica en el extranjero, para cimentar sólidamente esta idea que aportamos hoy y que es deber de españoles llevar muy pronto a la realidad, siguiendo las consignas de paz del invicto Caudillo de España.

## 2. ALGUNOS ANTECEDENTES DEL CICLO MERCURIO-VAPOR DE AGUA

La idea de aumentar el rendimiento de los ciclos térmicos, sin necesidad de llegar a las elevadas presiones que precisa el ciclo de vapor de agua, data ya de bastantes años, y el camino para lograrlo es

(1) La producción media en España durante los últimos años ha sido de unos 50.000 frascos; es decir, 1.725 Tm., y conviene recordar que en épocas anteriores se han llegado a alcanzar los 85.000 frascos, o sean, cerca de las 3.000 Tm.



Una sección de la central de mercurio de la General Electric, en Schenectady.

lógico que se buscara mediante el empleo de dos fluidos distintos. Pues, si el ciclo rígido de vapor de agua, el rendimiento está determinado, principalmente, por la que pudiéramos llamar «cota de su zona de saturación», y si nos fijamos también en que el valor máximo de este rendimiento se ha de buscar en la mayor separación de las isotermas del ciclo entrópico; al descender las zonas superiores, precindiendo de fijar forzosamente en el uso de dos fluidos distintos con entropías diferentes: Uno, para la isoterma superior, que permita a la tensión del vapor una subida relativamente lenta con la temperatura, y, el otro, para la isoterma inferior, que favorezca, contrariamente, una subida de la tensión del vapor mucho más velozmente que la temperatura, lo que, en definitiva, equivale a la superposición simultánea de dos diagramas entrópicos. Sin embargo, para dilucidar acertadamente la vía que hay que seguir, era preciso determinar cuáles eran los fluidos idóneos para realizar prácticamente la idea teórica.

En Norteamérica se intentó emplear inicialmente el óxido de difenilo ( $C_2H_5O_2$ ) para el ciclo superior, cuya temperatura de ebullición es de  $256^\circ C$ , y la tensión del vapor de  $14 \text{ kg./cm.}^2$  a  $426^\circ C$ , y su presión crítica de  $32 \text{ kg./cm.}^2$  a  $530^\circ C$ . Este ciclo tenía la indudable ventaja de su estabilidad a las altas temperaturas, la de no ser corrosivo y realmente poco nocivo, y la de que puede soportar largo tiempo elevadas temperaturas sin descomposición ni recalentamiento por expansión adiabática.

En Alemania se hicieron ensayos con amoníaco



producido por la descomposición de un cloruro doble de cinc y de amonio, que al calentarse, desprendía el gas amoníaco que se transformaba en cloruro. Al expandirse el amoníaco en la turbina correspondiente se mezclaba con el cloruro mono-amoniaco y, combinándose con él, emanaba importante cantidad de calor que servía para producir vapor de agua, segundo fluido del ciclo inferior que accionaba otra turbina de tipo normal.

En Francia se imaginó otro ciclo mixto que empleaba el vapor de agua como fluido superior y éter, anhídrido sulfuroso o sulfuro de carbono, como fluido inferior, aunque no llegó tampoco a tener realización práctica.

En Europa se atribuyó la teoría original del ciclo de mercurio a Kearton, que presentó en Inglaterra al «Institute of Mechanical Engineers», en 1924, un trabajo sobre el particular, pero en Norteamérica, con anterioridad, en 1913, el doctor W. Le R. Emmet, había presentado ya al «American Institute of Electrical Engineers» un documento titulado «POWER FROM MERCURY VAPOR», que contenía ya las ideas fundamentales de este nuevo proceso, describiendo la primera caldera experimental tal como está representada en la fig. 1.

Dicho generador consistía en un simple tubo que en su parte superior lleva adosado un cilindro que permite, mediante un orificio, la circulación del líquido hasta la parte baja del tubo. Sobre el «calderín» existía una palanca conectada a una varilla situada en el interior del tubo, gracias a cuyo artificio fué posible

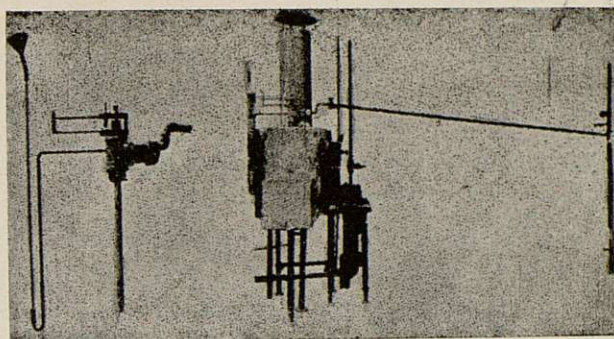


Fig. 1.—Primera caldera experimental de EM.MET.

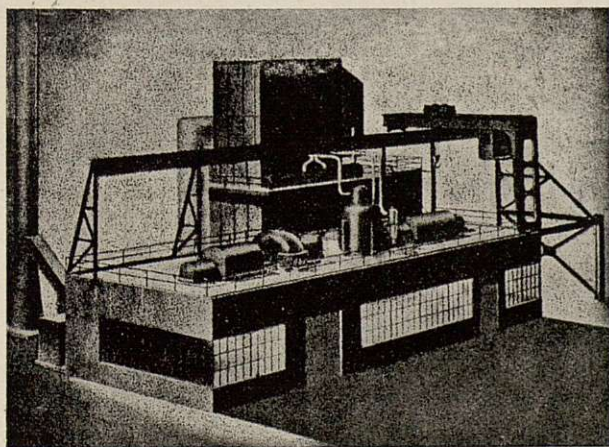
medir la diferencia media de temperatura entre las paredes exteriores, sometidas a la acción del calor, y el mercurio, en contacto con la varilla interior.

El conjunto de la rudimentaria caldera puede verse en la parte central de la citada figura 1, donde puede observarse, a la izquierda, una ampliación de las partes fundamentales que muestra la forma de llenar el aparato. A la derecha se ve la columna que hacía las veces de condensador.

Esta concepción elemental puso ya de manifiesto algunas de las necesidades primordiales de la caldera de mercurio. Al propio tiempo se efectuaron diversas pruebas de ebullición del mercurio empleando tubos concéntricos de vidrio, que vinieron a demostrar la posibilidad de fácil circulación del líquido, siempre que se pudiesen absorber grandes cantidades de calor con pequeñas diferencias de temperatura entre el líquido y las paredes calientes. Se pudo observar también que, mientras el mercurio no «mojaba» la superficie calefactora, existía la tendencia del vapor a formar una especie de película que impedía una buena transmisión calorífica. Para evitar este defecto había que buscar veloz circulación, que era preciso mantener hasta que la cantidad de vapor fuese reducida y el líquido caliente alcanzara la parte superior del tubo.

Esta dificultad para «mojar» las paredes iba a ser uno de los inconvenientes más importantes que presentaba el nuevo ciclo, pero que, años más tarde, sería felizmente resuelto, como explicamos en otro capítulo, y hacer posible, con ello, una mejora notable de las condiciones de transmisión del calor, aun con débiles velocidades de circulación.

También las altas temperaturas imposibilitaban el hermetismo de las juntas, y fué necesario disponer de



Maqueta de una central a la intemperie a base de vapor de mercurio.



una especie de resorte consistente en tubos achata- dos y convenientemente curvados que se soldaban a dos colectores conectados mediante un tubo de retor- no. En definitiva, se construyeron varias calderas de tipos similares y con capacidades distintas, con las que se efectuaron muchos experimentos, gracias a los cuales fué posible accionar, por fin, favorablemente una turbina de 1.000 kw.

Tales resultados animaron grandemente a los cons- tructores, que pudieron ya comprobar prácticamente la economía teórica del nuevo ciclo, lo que los incitó a

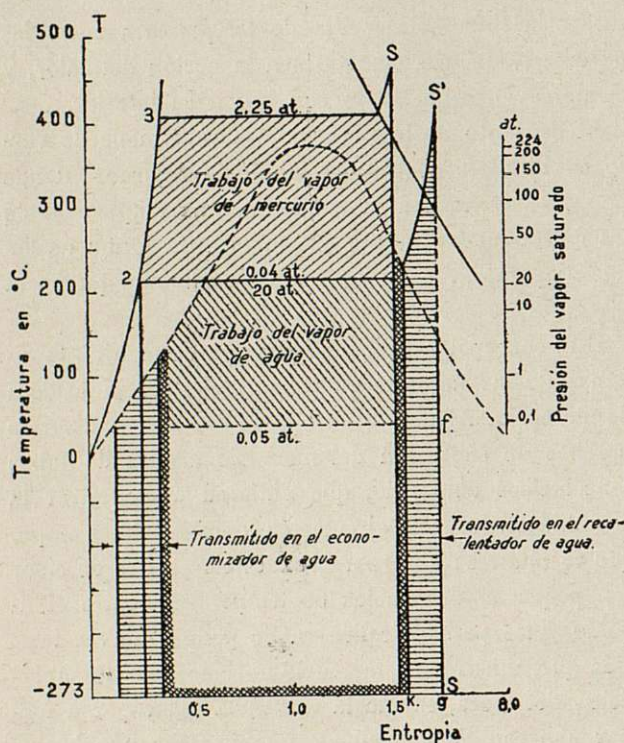


Fig. 2. - CICLO ENTRÓPICO DE EMMET.

resolver los distintos problemas de índole mecánica que se presentaban.

En la figura 2 se ha representado el ciclo entró- pico según la nueva concepción, en el que resulta fá- cil comprender cómo el mercurio, calentado en una caldera adecuada, adquiere el estado de vapor satura- do a la presión de 2,25 atmósferas y temperatura de unos 400° C, y, después, recalentado hasta 450° C se expande, adiabáticamente, en una turbina hasta la presión de 0,04 atmósferas y 225° C, y pasa luego a un condensador en donde al propio tiempo que el mercurio

recupera su estado líquido, se produce la evaporación del agua refrigerante, por lo cual esta parte de la instalación suele ser denominada «condensador-calde- ra». El vapor de agua saturado a unas 20 atmósferas y 210° C, que así se obtiene, pasa después al recalenta- dor donde alcanza una temperatura de 400° C, y ac- ciona, al expandirse, una segunda turbina de vapor que complementa la instalación.

El ciclo de mercurio superpuesto al de vapor de agua aumenta el rendimiento del ciclo binario resul- tante, merced a la elevada temperatura de ebullición del mercurio, que, a la baja presión de 10 kg./cm.<sup>2</sup>, es de 525° C, mientras que la del agua a la elevada pre- sión de 88 kg./cm.<sup>2</sup> es tan sólo de poco más de 300° C.

En la figura 2, los dos ciclos se han representado en el mismo diagrama entrópico, por haber elegido ma- sas de fluidos y orígenes tales que las escalas de las entropías coinciden. Es evidente que la relación de éstas varía con la temperatura del condensador-calde- ra y el grado de recalentamiento alcanzado. Para el mercurio y el agua esta relación entrópica es muy pró- xima a diez.

Conviene que nos fijemos en que este ciclo binario de que nos ocupamos está muy próximo al ciclo teóri- co de Carnot para las mismas temperaturas y que su rendimiento global es del orden del 37 al 38 %, y el térmico del 52 %; cifras éstas que, como veremos, son alcanzadas por instalaciones de vapor de agua a elevadísima presión, allá por los 130 kg/cm<sup>2</sup> como mí- nimo. No debemos olvidar que la eficiencia de un ci- clo depende principalmente de la diferencia entre las temperaturas de saturación a las cuales trabaja, es de- cir:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

y que, al superponer el ciclo de mercurio a uno de vapor, se refuerza el rendimiento resultante como con- secuencia de la alta temperatura de ebullición del mer- curio.

### 3. LA EFICIENCIA DEL CICLO BINARIO DE MERCURIO

La comparación que, acerca del rendimiento de esta clase de instalaciones vamos a efectuar a continuación, hemos de referirla, forzosamente, a algunas centrales térmicas extranjeras, ya que tratar de circunscribirla al área nacional no sería lógico dado el estado de nues-



tras antiguas térmicas, y puesto que, por el momento, no se conocen todavía los consumos medios a largo plazo de las tres o cuatro nuevas centrales que acaban de entrar en servicio.

Para comprender mejor lo que acabo de indicar basta con citar algunas cifras. Según los datos recogidos en mi anterior trabajo «LAS ALTAS PRESIONES Y TEMPERATURAS EN LAS APLICACIONES TERMODINÁMICAS», el consumo medio de calor en nuestras principales térmicas era del orden de las 6.700 cal/kw-h, mientras que el de la «South Meadow Station», en Norteamérica, que emplea el ciclo de mercurio-vapor de agua, fué tan sólo de 2.570 cal/kw-h; es decir, menos de dos y media veces nuestro consumo.

Esperamos que las nuevas térmicas españolas alcancen valores próximos a las 4.000 cal/kw-h.

En la figura 3 se ha llevado a cabo esta comparación con respecto a distintas centrales norteamericanas y con cifras más bien conservadoras que represen-

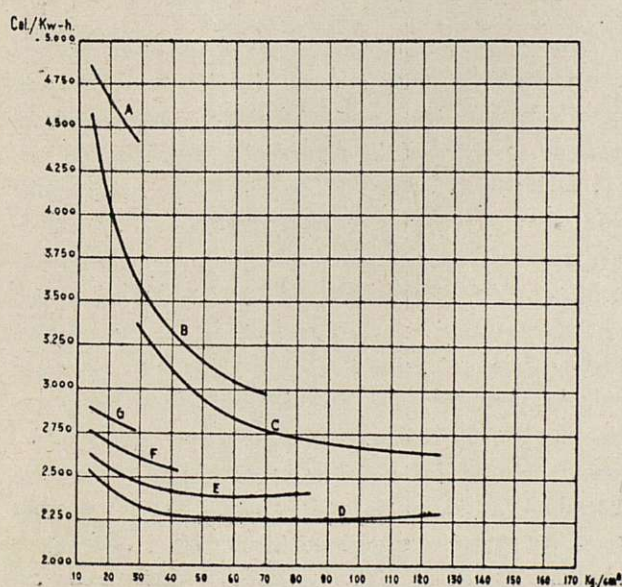


Fig. 3.—Consumos caloríficos en centrales de vapor con condensación pura y en otras con ciclo de mercurio.

tan los diversos valores medios obtenidos en las mismas. En abscisas se han representado las presiones de trabajo y en ordenadas los consumos caloríficos netos por kilovatio-hora. Al trazar las distintas curvas se han considerado, para presiones medias, hasta unos 42 kg/cm.<sup>2</sup>, turbinas con potencia unitaria de 10.000 kw., y, para las altas presiones del orden de los 50.000 a 100.000 kw., y debe advertirse que las de menor po-

tencia que trabajan a elevada presión, aumentan su consumo en un 3 a 4 %, y que, por el contrario, las grandes turbinas a presiones bajas lo mejoran en un 2 %, aproximadamente.

Las curvas A, B y C nos muestran los consumos específicos relativos a tres clases de centrales de vapor con condensación pura. La primera nos representa el caso de una central anticuada de baja presión y con deficiente rendimiento de calderas, en parte, comparable a algunas de las térmicas españolas que han conservado aceptable estado de conservación. La segunda se refiere a centrales más modernas, donde se sobrepasa, incluso la zona de las medias presiones y con rendimientos en calderas cerca ya de los valores máximos. La tercera corresponde a térmicas construídas de conformidad con las técnicas más modernas y, por lo tanto, con rendimientos en calderas que no son normalmente superados.

Cabría todavía representar algún caso especial con doble recalentamiento del vapor y presiones más elevadas, pero las diferencias en los consumos son de poco más de 100 cal/kw-h. y no se han dibujado en la figura, para mayor claridad de la misma.

Las curvas D, E, F y G nos hacen ver los consumos para diversas centrales que utilizan el ciclo binario. En ellas se superpone el de mercurio al de vapor de agua para diversas presiones. La primera se refiere a grandes turbinas de mercurio con alta temperatura de éste, y las tres siguientes para turbinas de menor potencia y temperatura también algo más reducida.

Si nos detenemos a examinar las curvas C y D, que son las más favorables para ambas clases de centrales, y si nos fijamos en la abscisa de presión 70 kg/cm.<sup>2</sup>, que nos da el mínimo para la segunda, podremos observar que la central de vapor de agua consume 505 calorías más por kilovatio-hora que la de mercurio; es decir, que consume más combustible que la segunda, en cantidad algo superior al 22 %.

Esta mayor eficiencia del ciclo binario proviene, principalmente, de que la adición de calor se efectúa, en su mayor parte, a la alta temperatura de saturación del mercurio, que suele oscilar, normalmente, entre los 475 y 525° C, mientras que para el vapor de agua a una presión, por ejemplo, de 85 kg/cm.<sup>2</sup> y temperatura de 540° C, las tres cuartas partes del calor las absorbe el vapor a temperatura inferior a los 300° C.



En los Cuadros núms. 1 y 2 se han recogido los valores originales para la preparación de las curvas citadas anteriormente.

El consumo específico utilizando el ciclo mercurio-vapor de agua aumenta siempre al disminuir la pre-

**CUADRO NÚM. 1**

**Características de diversas centrales norteamericanas que trabajan con vapor de agua y con condensación pura**

Curva	Presión vapor. kg/cm <sup>2</sup>	Temperatura vapor °C	Presión escape mm. Hg. abs.	Núm. de precalentamiento	Temperatura agua alimentación °C	Consumos servicios auxiliares %	Rendimiento calderas %
A	14	302	38	2	35	4,0	75,0
	28	343	38	2	46	4,0	77,5
B	14	343	25	2	57	3,5	76,0
	60	440	25	4	149	5,0	86,0
	88	482	25	4	177	6,0	86,0
C	14	343	25	2	57	3,5	80,0
	60	482	25	4	204	5,0	88,0
	88	510	25	5	232	6,0	88,0
	126	538	25	6	243	6,5	88,0

**CUADRO NÚM. 2**

**Características de diversas centrales que utilizan el ciclo binario de mercurio**

Curva	Presión vapor condensador-caldera Kg/cm <sup>2</sup>	Temperatura mercurio °C	Consumo servicios auxiliares %	Rendimiento calderas %
D	14	525	4	87
	28	525	4	87
	42 a 84	525	4 a 6	87
E	14	475	4	87
	28	475	4	87
	42 a 84	475	4 a 5	87
F	14	475	4	85
	28	475	4	85
	42	475	4	85
G	14	475	4	85
	28	475	4	85

sión del vapor, lo cual se debe, principalmente, al menor rendimiento de la turbina de mercurio derivado del gran volumen en circulación en las últimas etapas de la misma, de modo que el vapor de agua obtenido en el condensador-caldera se genera a menor temperatura. Sin embargo, este menor rendimiento de la turbina puede ser superado produciendo el vapor de agua y más alta presión y si se incluye a continuación una pequeña turbina de vapor que, trabajando a contrapresión, nos suministre el vapor de agua a la presión más conveniente en cada caso.

En general, puede decirse también que, para el ciclo mixto, las pequeñas turbinas de mercurio no justifican el empleo de las altas temperaturas para el mismo, que son, sin embargo, muy ventajosas para las de mayor potencia.

#### 4. DE CÓMO AUMENTA LA POTENCIA DE LAS TÉRMICAS AL SUPERPONERLES EL CICLO DE MERCURIO

Empecemos por suponer una central termoelectrica que trabaja según el ciclo clásico de vapor de agua, pero a presión relativamente baja, y consideremos el caso de su renovación, eliminando, para ello, las viejas calderas, ya en mal estado, que serán substituídas por otras a mayor presión y temperatura, que suministrarán el vapor producido a las nuevas turbinas a contrapresión, y, precisamente, con presión de escape que corresponde con la de admisión de las antiguas turbinas de condensación, cuyo estado de conservación ha permitido mantenerlas en servicio. En definitiva, se trata, sencillamente, de un caso típico de superposición de dos ciclos de vapor que se viene practicando con frecuencia y con buen éxito en muchas centrales extranjeras, que no se resignan a los exiguos rendimientos de las bajas presiones y que pueden así aprovechar todavía las antiguas turbinas cuyo estado de conservación lo permite.

Pues bien, de manera análoga podemos mejorar dicha central si utilizamos y se superpone un nuevo ciclo de mercurio, lo cual, aparte las ventajas relativas a su rendimiento, presenta la favorable condición de que la potencia disponible en este segundo caso será mayor que en el primero.

Con más detalle podremos comprobar lo anterior si nos fijamos en la figura 4, en la que se han representado varios casos, tomando en abscisas las presiones y



en ordenadas los coeficientes que corresponden al aumento de potencia. Éste es siempre mayor para el ciclo mixto de mercurio-vapor de agua, si bien conviene tener en cuenta la influencia de los factores siguientes:

- El alto rendimiento de la turbina de mercurio.
- El menor rendimiento de la turbina de vapor de agua.
- La baja temperatura del agua de alimentación.
- El menor grado de recalentamiento.
- La alta temperatura del agua de refrigeración.

Si nos fijamos en estas curvas que nos dan el aumento de potencia y las cotejamos con las del Capítulo 3, sobre consumos de calor, observaremos la mayor sensibilidad del coeficiente de potencia con respecto a las variaciones de las características de cada ci-

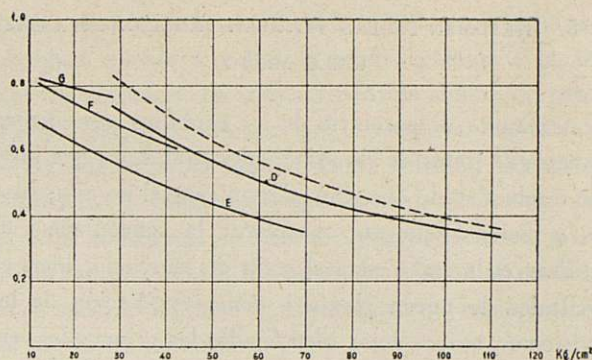


Fig. 4.- COEFICIENTES DE AUMENTO DE POTENCIA EN CENTRALES DE VAPOR AL RENOVARLAS CON EL CICLO DE MERCURIO.

clo, y la mayor estabilidad en los consumos caloríficos. En el Cuadro núm. 3, que se incluye a continuación, pueden comprobarse las diferencias que señalamos, al variar los diversos factores correspondientes al ciclo mixto que en él se toma como ejemplo.

### CUADRO NÚM. 3

Variación de la potencia y consumo calorífico en los ciclos binarios de mercurio

Cuándo varía:	entre	El valor relativo para el coeficiente de potencia resulta ser:	El valor relativo para el consumo calorífico resulta ser:
la temperatura de vapor	400 °C	105,0	100,0
	440 °C	100,0	100,0
	480 °C	95,2	99,6
el número de precalentamientos	2	102,2	101,1
	4	100,0	100,0
	5	99,6	99,6
la temperatura del agua de alimentación	150 °C	102,2	101,1
	180 °C	100,0	100,0
	205 °C	97,7	99,4
la temperatura del mercurio	475 °C	100,0	100,0
	525 °C	137,0	94,2
	540 °C	143,4	93,0
la presión del vapor	40 Kg/cm²	100,0	100,0
	60 Kg/cm²	84,5	100,5
	90 Kg/cm²	67,5	102,6
la presión de escape	25 mm. Hg. abs.	100,0	100,0
	40 mm. Hg. abs.	103,6	102,3
	65 mm. Hg. abs.	107,9	105,0
la potencia unitaria	10.000 Kw.	105,0	103,1
	25.000 Kw.	100,0	100,0
	85.000 Kw.	99,6	99,6

OBSERVACIÓN: Los valores que se han tomado como base para la comparación son los que corresponden al valor relativo 100, para los que resulta un consumo real de calor de 2.350 cal/Kw-h. y un coeficiente de potencia de 0,5 aproximadamente.



## 5. RESUMEN DE LAS VENTAJAS INHERENTES A ESTE CICLO MIXTO

A manera de corolario de los capítulos precedentes, y antes de tratar de los principales problemas que hubo de resolver, y de describir alguna central de esta clase, para poder finalmente considerar la conveniencia de utilizar en nuestro país el ciclo de mercurio, bien en centrales de nueva planta o como ampliación de las existentes, quiero dejar bien fijadas las principales ventajas que, con carácter general, se derivan del mencionado ciclo mixto y que se exponen a continuación:

Primera. El consumo específico de calor en el ciclo mercurio-vapor de agua, es más reducido que en el ciclo normal en unas 500 a 625 calorías por kilovatio-hora, lo que supone una mejora del 18 a 22 % sobre las instalaciones más eficientes de vapor a alta presión.

Segunda. El ciclo binario de mercurio presenta un consumo de calor prácticamente constante para presiones del vapor de agua comprendidas entre 28 y 84 kg/cm<sup>2</sup>, que serán los valores límites más adecuados para establecerle.

Tercera. En la renovación de las antiguas centrales termoeléctricas, el ciclo de mercurio superpuesto tiene la enorme ventaja de duplicar así la potencia que se obtendría en el caso de que la adición del nuevo ciclo fuese a base de vapor de agua, exclusivamente.

Cuarta. Las propiedades del mercurio permiten fácilmente una normalización de las características de los diversos elementos que componen una instalación de esta clase, aun al considerar amplia gama de presiones para la misma.

Quinta. El coste de una central a base del ciclo de mercurio es muy semejante al de otra análoga de vapor de agua a elevada presión, y aún en aquellos casos en que resulta ligeramente superior, queda sobradamente justificado por el ahorro de combustible y aumento de potencia que de su empleo se derivan.

Sexta. En aquellos lugares donde el caudal para el agua de refrigeración es limitado, viene a resolver las más de las veces el grave problema de la ampliación de las centrales, pues sin necesidad de buscar nuevas aportaciones hidráulicas, permite incrementar notablemente la potencia disponible.

## 6. CÓMO SE RESOLVIERON LOS PROBLEMAS INHERENTES A LAS CALDERAS DE MERCURIO

Estimo que la exposición y resolución de un problema técnico aporta siempre una serie de datos interesantes que ponen de manifiesto el ingenio de los constructores e investigadores que con ellos colaboraron, que bien nos sirven en ocasiones para el desarrollo de trabajos similares con indudables consecuencias prácticas o que, al menos, nos ilustran e informan de su génesis, lo que para todo ingeniero supone siempre fuente muy estimable del saber que nunca debe despreciarse.

Por ello, al tener conocimiento de los problemas principales que se habían presentado en los primeros generadores de vapor de mercurio, creí un deber añadir algún capítulo a este trabajo, en el que se pusiesen de manifiesto los mismos, así como la marcha seguida para su resolución.

En un principio, esta clase de calderas se construyeron con tubos de acero de bajo contenido de carbono, sometiéndolos en la mayoría de los casos a tratamiento térmico adecuado. Poco después se empezaron ya a utilizar los aceros al cromo-molibdeno, y, a partir del año 1937, se iniciaron muy diferentes pruebas acerca de la duración y rotura de muchos tipos de aleaciones. De esta forma, se pudo seleccionar una cierta aleación denominada Sicromo 5S, que contenía:

0,12 % de carbono.  
0,50 % de molibdeno.  
5,00 % de cromo.  
1,50 % de silicio.

la cual, debido a sus proporciones de cromo y silicio, era capaz, ya, de resistir a la oxidación, a la elevada temperatura de trabajo que se utilizaba, así como también al efecto abrasivo de las cenizas de carbón o de «fuel-oil».

Existía, además, el problema de la solubilidad del hierro en el mercurio, obstáculo éste que dificultó notablemente el desarrollo inicial del nuevo ciclo térmico, pues, además de disminuir el espesor de los tubos al desintegrar el metal, alteraba la transmisión del calor, por los irregulares depósitos de óxido de hierro a que daba lugar, y distorsionaba también la circulación del mercurio o del vapor.



Dicha solubilidad fué retrasada mediante el uso de la citada aleación Sicromo 5S, como se deduce del Cuadro núm. 4.

CUADRO NÚM. 4

Solubilidad del acero en el mercurio en milésimas de gramo por año

Temperatura °C	Acero al carbono	Acero con 5 % de cromo	Sicromo 5S
480	4	2	0,2
540	9	4	0,5
595	22	10	1,1
650	53	25	2,5

También el circonio y el titanio, con preferencia este último, debido a su más fácil aplicación, eliminan, a su vez, las dificultades derivadas de la solubilidad del hierro. Pueden establecerse diferentes proporciones de titanio, según la temperatura de trabajo; así, para 455° C se utiliza el 0,0001 % y para 540° C el 0,001 %.

Pero el problema que pudiéramos llamar fundamental, relacionado, a su vez, con el de la formación de óxidos de hierro, y que ya ha sido aludido en otro capítulo, es el de la gran dificultad por parte del mercurio para «mojar» los tubos de acero de la caldera; dificultad atribuible, en gran parte, al escaso poder desoxidante del mercurio, lo que venía a perturbar aún más las ya problemáticas condiciones en que se realizaba la transmisión del calor a través de las superficies de calefacción.

Para resolver esta espinosa cuestión, diversos especialistas de la «General Electric» hubieron de desplegar extraordinaria actividad y construir centenares de pequeños recipientes a manera de calderas rudimentarias, dentro de los cuales se colocaron trocitos de acero bien pulidos y previamente pesados, sobre los que se realizaron muchos experimentos trabajando durante muchas horas a temperaturas entre 650 y más de 700° C con objeto de acelerar todo lo posible los resultados. Para ello, al mercurio contenido en cada caldera se le adicionaban uno o más elementos tales como: estaño, plomo, sodio, magnesio, titanio, circonio, etc., etc., con los cuales se efectuaron muy diversas combinaciones.

Antes de llegar a resultados concluyentes se llevaron a término más de trescientas pruebas, en una de las

cuales, merced a la acción del titanio y el sodio, se consiguió que la muestra de acero sometida a la acción del mercurio no sufriera pérdida alguna de peso, una vez limpia de la capa que la recubría, demostrando así que se había llegado a una solución inicial satisfactoria, y comprobar que la transmisión de calor en el tubo lleno de mercurio era ya excelente y corroborándose también los resultados obtenidos mediante el análisis químico y el examen microscópico de las partes así tratadas.

Análogamente, merced a la adición de magnesio y una pequeña cantidad de hidruro de titanio al mercurio, éste presenta la propiedad de «mojar» los tubos, debido a que el magnesio se combina con las pequeñas cantidades de oxígeno que puedan existir y evitasen la oxidación del titanio, con lo que se perdería la mencionada propiedad. Gracias a este descubrimiento ha sido realmente posible la aplicación práctica del ciclo binario de mercurio.

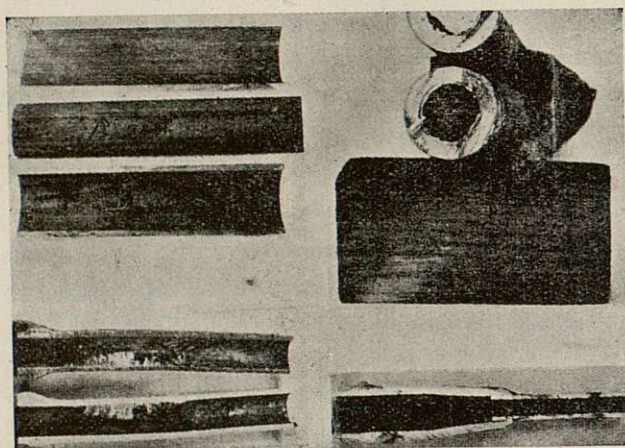
Se comprende fácilmente, como consecuencia de lo anterior, que habrá que tomar toda clase de precauciones para evitar la existencia de aire en el interior de la caldera, para lo cual se inyecta un gas inerte, como el nitrógeno, en los períodos de puesta en marcha y parada, el cual queda en contacto con el mercurio; se han adoptado válvulas especiales bajo la acción del vacío, así como nuevos tipos de juntas para evitar también el paso del aire. Con tales precauciones la cantidad de aire, que solía alcanzar valores próximos a los 10 m<sup>3</sup>/h., ha quedado reducida a una cifra del orden de 0,01 m<sup>3</sup>/h. Se han cursado instrucciones especiales a todas las centrales de este tipo para que se vigilen e investiguen con detenimiento las causas que puedan motivar caudales superiores a los 0,03 m<sup>3</sup>/h.; cifra ésta que ya se considera como perjudicial.

Para evitar la posibilidad de que algunos tubos puedan adquirir temperaturas elevadas, como consecuencia de defectos de circulación, incrustaciones, etc., etcétera, se ha ideado y aplicado con buen éxito otro accesorio interesante: el registrador múltiple de temperaturas, el cual inscribe sistemáticamente, de hora en hora, las temperaturas de los cientos de tubos que comprende el hogar, y de tal forma que cualquiera anomalía en las mismas hace sonar un timbre de alarma que avisa inmediatamente al operador.

Para evitar posibles pérdidas de mercurio durante



el funcionamiento de la caldera, se han ideado detectores adecuados; uno de ellos consiste en hacer pasar de manera continua una pequeña parte de los gases de la combustión, a manera de muestra, por un artificio donde se proyecta una luz de rayos ultravioleta, de forma que ésta pueda poner en servicio un sistema de alarma ante la presencia de vapores de mercurio en los mencionados gases. Análogamente, se pueden hacer pasar éstos sobre un papel tratado con sulfuro de selenio que se ennegrece si aparecen vestigios de vapor de mercurio y actúa entonces la alarma gracias a un relé de tipo fotoeléctrico.



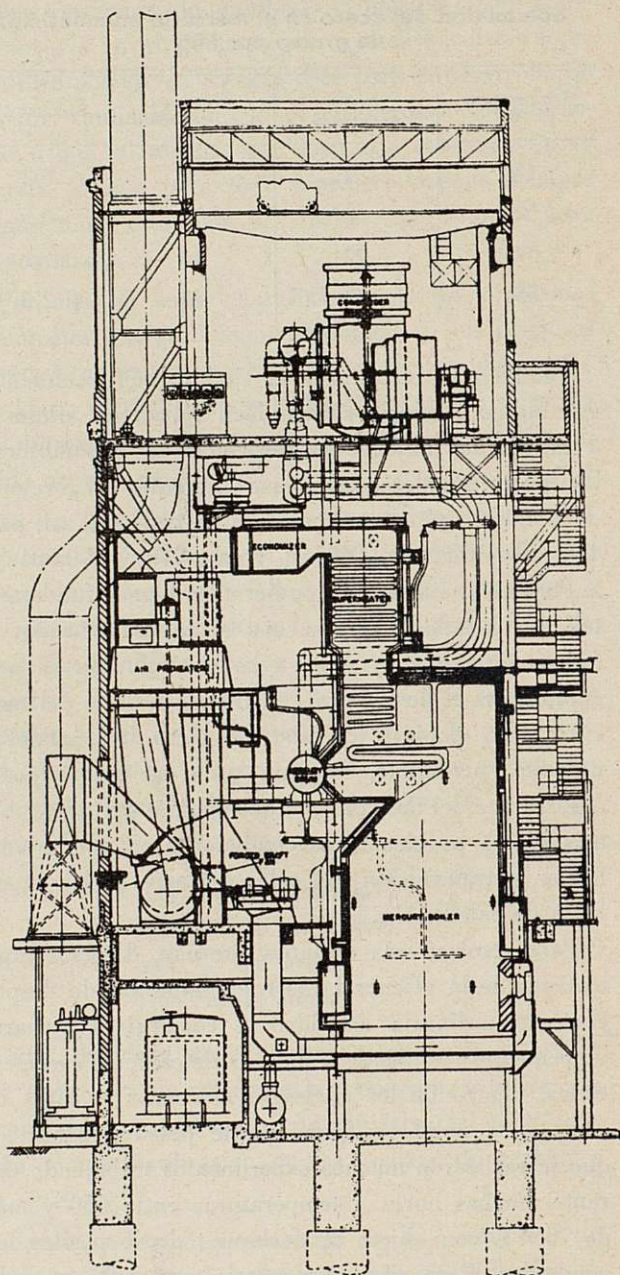
Diversos tubos utilizados en las primeras calderas de mercurio que muestran los depósitos de óxido de hierro.

## 7. LA PRIMERA CENTRAL QUE UTILIZÓ EL MERCURIO Y SU RECIENTE MODERNIZACIÓN

Como siempre, las primeras aplicaciones que se lograron en la práctica con el nuevo ciclo mixto tuvieron lugar en los Estados Unidos de Norteamérica, en donde la conocida empresa «General Eléctric Company» les prestó particular atención.

Las dos primeras centrales se instalaron en Hartford y Kearny, y poco después en Schenectady, donde la mencionada empresa tiene una de sus más importantes factorías. De este grupo de centrales vamos a destacar la primera para dedicarle con preferencia nuestra atención, pues ello nos permitirá seguir su evolución hasta alcanzar su actual renovación y mejora, lo que podrá darnos idea más completa de las condiciones de su explotación y nos ilustrará también acerca de la forma de proceder en el caso de nuestro país.

El nombre de la central es «SOUTH MEADOW» y pertenece a la «HARTFORD ELECTRIC LIGHT COMPANY», la cual, en 1921, había instalado una central térmica de vapor a la presión de  $17,5 \text{ kg/cm}^2$  y  $370^\circ \text{ C}$ ,



Central de SOUTH MEADOW. - Sección de conjunto.

a la que superpuso, en 1928, el ciclo de mercurio comprendiendo en él una turbina de 10.000 kw. para trabajar con el vapor de este metal, según el ciclo representado en la figura 5.



Desde el citado año 1928 hasta el 1947 la central ha trabajado por un total de 119.000 horas, lo que supone una utilización algo superior al 70 %, y ha producido en este lapso más de 1.700 millones de kilovatios-hora. El detalle de las producciones hasta 1940 está recogido en el Cuadro núm. 5, que se incluye a continuación.

Al cumplirse, aproximadamente, los 20 años de su instalación, se pensó en renovarla, buscando no sólo la mejora de sus condiciones, sino también por apro-

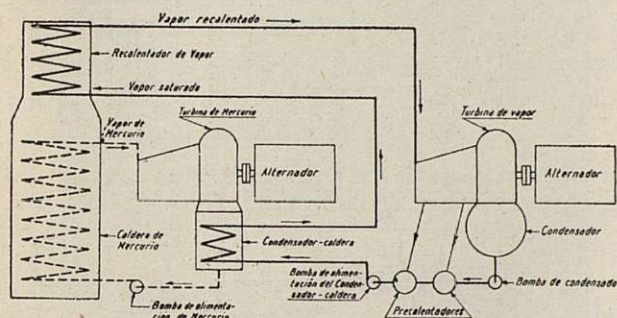


Fig. 5.—Esquema de circulación del ciclo mercurio-vapor de agua.

vechar las nuevas aleaciones especiales que hoy se fabrican y que permitirán aumentar la vida de una central de esta clase, que, con sus cuatro lustros de existencia, puede muy bien considerar alcanzado el límite de su vida económica, por lo menos, en cuanto a sus partes fundamentales, aunque algunos de sus elementos sean susceptibles de adaptación para nuevo y largo período de funcionamiento.

Cuando se hizo el estudio para la modernización de la central, se pensó aumentar su potencia en un 50 %, y aprovechar los más recientes adelantos de la técnica acerca de esta clase de instalaciones. Para ello, durante el verano de 1947 se comenzaron a desmontar las partes principales, con objeto de emplazar la nueva turbina de 15.000 kw., que habría de ser capaz de producir unas 100 Tm/hora de vapor de agua en el condensador-caldera, a la presión de 28 kg/cm<sup>2</sup> y 370° C; se aprovecharon de la antigua los calderines del citado condensador, así como las celdas de vacío.

También pudo recuperarse el alternador, que, merced a la amplitud de sus dimensiones, permitió su rebobinado para la potencia de 15.000 kw.

Para la caldera, véase figura 6, suministrada por la «Foster Wheeler Corporation», se adoptó el tipo normalmente usado en la actualidad, de paredes refrigeradas mediante tubos de circulación y superficies de convección para el vapor de mercurio. Se proyectaron de forma expresa el recalentador, el economizador y el calentador de aire, así como también todos los ventiladores necesarios. El vapor de mercurio se obtiene a la presión de 9 kg/cm<sup>2</sup> y unos 520° C, y circula a través de cuatro colectores generales que concurren en la tubería única de alimentación de la turbina, la cual está emplazada en la parte superior de la caldera.

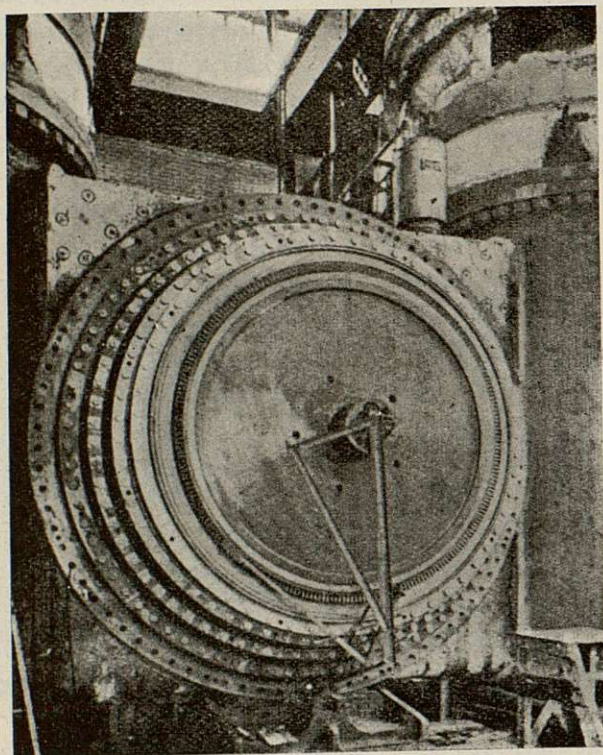
El vapor de mercurio procedente de la anterior turbina pasa a continuación a los dos condensadores verticales a la presión de 0,1 kg/cm<sup>2</sup> y 250° C, de for-

CUADRO NÚM. 5

Años	Producción con mercurio Kw-h.	Producción total neta inluida la de vapor Kw-h.	Cal/Kw-h.	Horas
1928	2.900.000	5.700.000	—	429
1929	5.600.000	11.700.000	2.820	993
1930	52.500.000	121.000.000	2.595	6.157
1931	5.400.000	12.700.000	2.845	651
1932	49.400.000	110.000.000	2.670	6.516
1933	43.000.000	102.000.000	2.685	6.753
1934	51.773.000	124.283.533	2.740	7.596
1935	49.190.000	122.096.850	2.580	7.217
1936	52.725.000	129.261.710	2.570	7.309
1937	49.979.000	125.737.275	2.550	7.729
1938	47.646.000	123.023.058	2.520	7.684
1939	50.240.000	131.122.000	2.520	8.140
1940 (9 meses)	27.712.000	74.897.000	2.580	5.162
<b>TOTAL:</b>	<b>488.065.000</b>	<b>1.193.521.426</b>	<b>—</b>	<b>72.331</b>



ma que, al condensarse, cede su calor de vaporización al agua contenida en el interior de los tubos que hacen el papel de los de las calderas de vapor de agua, el cual se obtiene, por fin, a la presión de 28-29



Una vista del interior de la turbina de 10.000 kw.

kg/cm<sup>2</sup>. Una vez condensado el mercurio vuelve, en estado líquido y por la acción de la gravedad, hasta la caldera de mercurio, y antes, pasa por un depósito clarificador, y se vaporiza nuevamente a la mencionada presión de 9 kg/cm<sup>2</sup>.

Por su parte, el vapor de agua obtenido en el condensador-caldera se recalienta hasta la temperatura de 370° C, mediante el recalentador colocado en la parte superior de la caldera de mercurio.

El agua de alimentación sale del economizador a la temperatura de 210° C, y el aire para la combustión alcanza unos 270° C en un calentador apropiado.

Tal vez puede llamar la atención el hecho de colocar la turbina de mercurio por encima del nivel de la caldera, pero ello es debido a la acción de la presión que transmite la columna líquida inferior que llena los colectores del hogar tubular y que es capaz de suministrar, proporcionalmente, la energía necesaria para

hacer circular la mezcla de mercurio y su vapor, como consecuencia de la expansión del primero al elevarse a través de los tubos, de forma que un hogar de este tipo que trabaje con normalidad, puede elevar grandes cantidades de la citada mezcla a lo largo de circuitos situados por encima del nivel del mercurio líquido contenido en la caldera. Esta liberación de energía, a que hemos aludido, tiene lugar como consecuencia del gran cambio de presión que se produce a lo lar-

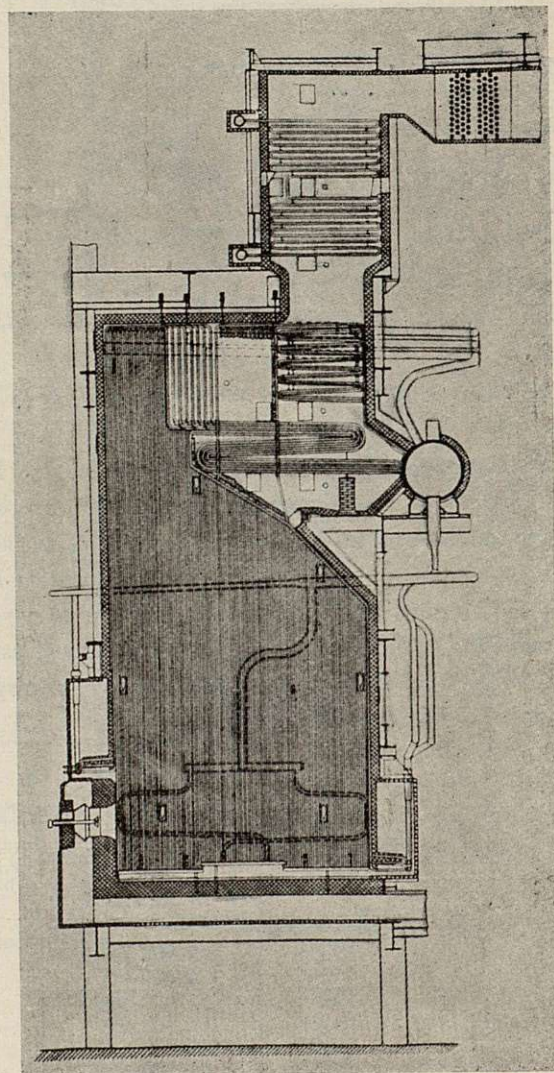


Fig. 6.—Central térmica de SOUTH MEADOW.  
Sección transversal de la caldera de mercurio.

go del haz tubular en donde hierve por vez primera el mercurio; es decir, en la parte baja del hogar en donde los tubos penetran en el calderín correspondiente. En caldera de gran tamaño esta presión inicial



puede llegar a ser, como mínimo, del orden de los 7 kg/cm<sup>2</sup>.

Como, al aplicar el calor a los tubos, se produce vapor en proporción creciente, la densidad teórica de la mezcla en circulación puede variar desde 12,5, que suele ser la del líquido tratado, hasta la de 0,4, que es propia de una mezcla pobre, y antes de que disminuya en los tubos la absorción de calor. En la caldera de Hartford se ha previsto que la mezcla, a la salida del calderín y hasta llegar a los tubos de convección para el vapor de mercurio, tenga densidad próxima a dos, sobre todo, hacia la parte más densa del circuito de carga, de forma tal que en dicha mezcla haya alrededor de 1 kg. de vapor por cada 7 kg. de mercurio líquido en circulación.

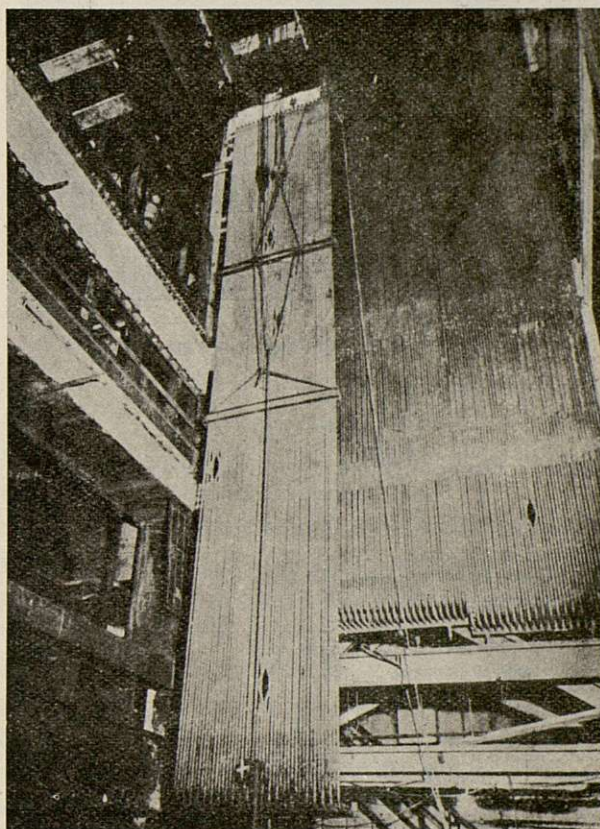
Todo lo anterior presenta la ventaja, desde el punto de vista económico, de no tener que llenar los tubos más que con una pequeña cantidad de mercurio, de forma tal que los que se llenan con líquido pueden ser de pequeño diámetro y bastante más anchos los destinados a vapor. En una caldera de este tipo, del 70 al 80 % de la superficie total de calefacción está destinada a zona de convección, pues se comprende que de no ser así y tener que llenar de mercurio todos los tubos, la cantidad total del mismo sería tan elevada que haría prohibitivo su empleo. En las primitivas calderas la cantidad de mercurio líquido necesario era del orden de los 17 kg. por kilovatio instalado, y, en las modernas, de unos 7 kg/kw.

Conviene no olvidar que muchas de las simplificaciones y economías a que venimos aludiendo han sido posibles gracias al tratamiento previo del mercurio bajo la acción del titanio y del magnesio, lo que viene a producir íntimo contacto entre el metal de los tubos y el mercurio en circulación. De esta forma, el metal pierde su estado esferoidal y se extiende en forma de película muy tenaz en el interior de los tubos; propiedad ésta que no pierde aunque se aumente en unos 100° C la temperatura de la mezcla líquido-vapor saturado.

El combustible utilizado en esta clase de calderas ha sido, indistintamente, el «fuel-oil» o el carbón pulverizado, según las conveniencias de cada caso particular.

La turbina de mercurio se renovó por completo, puesto que se iba a una elevación de la presión y de

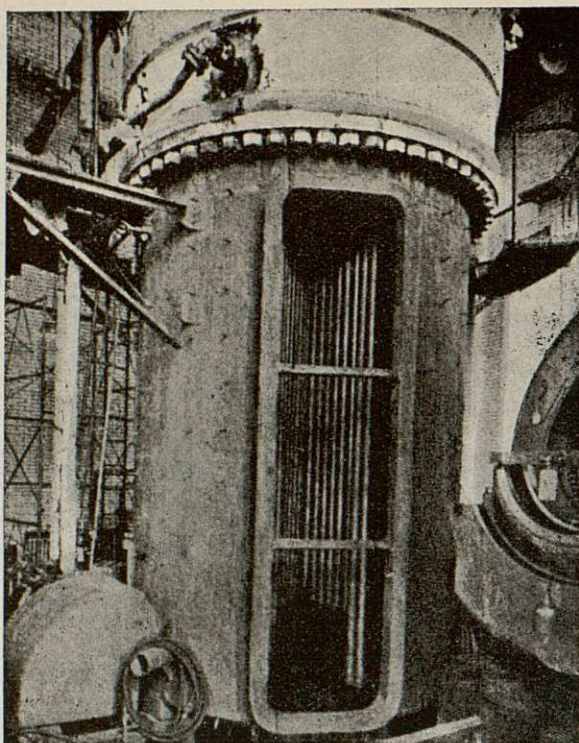
la temperatura. La nueva fué también construída por la «General Electric», que incluyó en la misma algunas innovaciones, tales como aleaciones especiales de vanadio-molibdeno en las partes sometidas a mayor presión; mejoras notables en las juntas de laberinto, así como en las válvulas de mando y de parada. Se modificaron también los diafragmas y cojinetes principales, y adoptó un nuevo tipo de los de doble empuje. En las fotografías que se incluyen pueden observarse dos vistas de la turbina de mercurio destapada y del condensador-caldera.



Central de SOUTH MEADOW.-Montaje de los haces tubulares del hogar en la caldera de mercurio.

Esta central de Hartford, después de su renovación, volvió a ser puesta en servicio el 1.º de febrero del presente año de 1949. A continuación en el Cuadro número 6 se recogen algunos datos sobre producción y consumo al finalizar dicho mes, que fueron dados a conocer en la reunión de la «American Society of Mechanical Engineers», celebrada en el mes de mayo último en New London, Connecticut.





Una vista del condensador caldera.

#### CUADRO NÚM. 6

Datos correspondientes al mes de febrero de 1949  
«South Meadow Station»

Combustible líquido .....	5.575.650 Kg.
Vapor producido 18 Kg/cm <sup>2</sup> 370 °C..	57.257.572 Kg.
Producción total con vapor .....	11.387.000 Kw-h.
Producción neta en conjunto .....	20.870.000 Kw-h.
Consumo específico de combustible..	267 Gr/Kw-h.
Consumo calorífico .....	2.570 Cal/Kw-h.

#### 7. APLICACIÓN TEÓRICA AL CASO DE CENTRALES TÉRMICAS ESPAÑOLAS

Para formarnos idea algo más concreta de lo que podría significar la aplicación del ciclo de mercurio para la renovación y ampliación de algunas antiguas centrales españolas, vamos a considerar dos casos bien distintos: el primero, para una central en Madrid, donde el precio del combustible es elevado y donde no hay facilidades para aumentar el caudal de agua del circuito de refrigeración; el segundo, para una central a bocamina, en Asturias, con combustible mucho más económico, y en la que, teóricamente, no exista problema de agua.

Para ello estableceremos a continuación los datos principales de ambas centrales y emplearemos el gráfico de la figura 7 para calcular qué mayores gastos de primer establecimiento podrían, como máximo, admitirse en los dos casos para renovar las indicadas térmicas mediante la superposición del ciclo de mercurio.

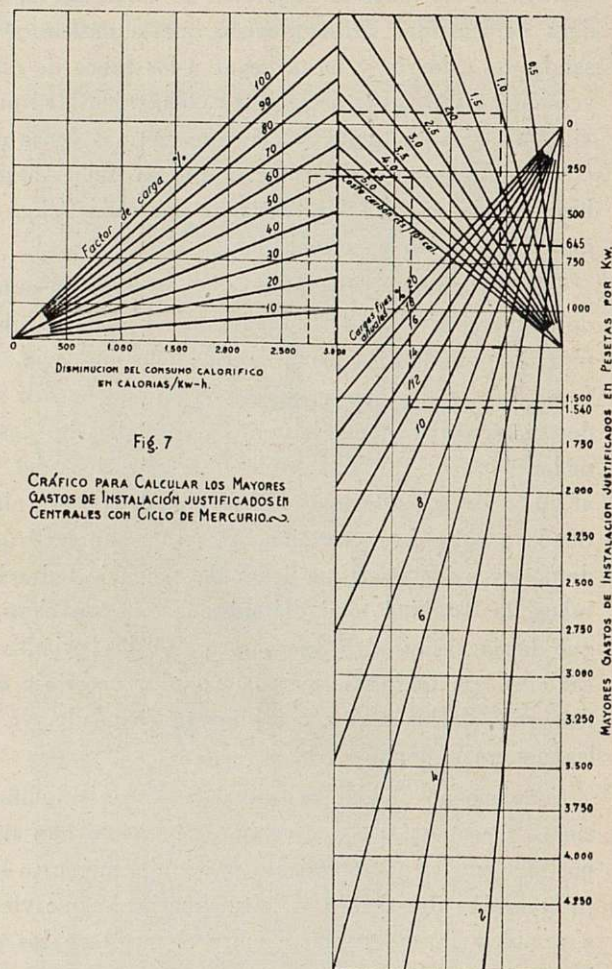


Fig. 7

GRÁFICO PARA CALCULAR LOS MAYORES  
GASTOS DE INSTALACIÓN JUSTIFICADOS EN  
CENTRALES CON CICLO DE MERCURIO.

##### a) Central térmica en Madrid.

Potencia .....	12.000 Kw.
Presión del vapor .....	15 Kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura del vapor .....	375 °C.
Coste del carbón .....	3,5 - 4 Cts/103 Cal.
Consumo de calor .....	6.750 Cal/Kw-h.
Disminución posible del consumo calorífico .....	3.750 Cal/Kw-h.
Disminución mínima admitida del consumo calorífico .....	2.750 Cal/Kw-h.
Factor de carga teórico .....	40 - 50 %
Cargas fijas anuales .....	12 %



b) *Central térmica en Asturias.*

Potencia .....	21.750 kw.
Presión del vapor.....	13 Kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura del vapor.....	350 °C.
Coste del carbón.....	1 - 1,5 Cts/103 Cal.
Consumo de calor.....	7.550 Cal/kw-h.
Disminución posible del consumo calorífico.....	4.550 Cal/kw-h.
Disminución mínima admitida del consumo calorífico .....	3.000 Cal/kw-h.
Factor de carga teórico.....	60 -70 %
Cargas fijas anuales.....	12 %

Como aclaración a los datos anteriores queremos indicar que, para el caso de Madrid, se ha supuesto la utilización de carbón de la cuenta de Puertollano a los precios oficiales autorizados en 1948, incrementados en los del coste del transporte por vagones completos. Para el carbón asturiano de baja calidad se ha admitido un coste de 40 a 60 Ptas/Tm. Como se han admitido consumos caloríficos mínimos muy reducidos, se han tomado, en cambio, factores de carga ligeramente superiores a los normales.

Pues bien, si partimos de lo anterior y por medio del gráfico citado de la figura 7, obtenemos los siguientes gastos justificados de instalación para el ciclo de mercurio:

Central en Madrid .....	1.540 Ptas/kw.
Central en Asturias .....	645 »

Si tenemos presente que las centrales térmicas de vapor de nueva planta que están en construcción en España resultarán del orden de las 3.000,— Ptas. por kilovatio instalado, con todos sus servicios auxiliares, quisiérase decir que podrían sobrepasarse justificadamente los costes normales en un 50 % para el primer caso, y en un 20 % para el segundo, cuando, en realidad, esta clase de ampliaciones con mercurio sólo costarían un 10 a 15 % más de las de vapor, según cifras relativas de las casas norteamericanas dedicadas a la construcción de esta clase de material.

En cuanto al aumento de potencia posible, sin variar el caudal de agua de refrigeración, nos fijaremos en el gráfico de la figura 4, para la curva G y presiones de unos 13 kg/cm<sup>2</sup>, la que nos da un coeficiente de aumento del orden del 83 %; es decir, que la central de Madrid podría instalar unos 10.000 kw. más

y la de Asturias 17.500 kw. a base de turbina de mercurio en ambos casos.

Por lo anterior podemos deducir la posibilidad económica de ampliar todas nuestras antiguas centrales según el mencionado ciclo; y aún en forma *absolutamente teórica* vamos a considerarlo a continuación, para darnos idea de lo que ello podría representar, en cuanto al aumento de potencia térmica y producción de energía termoeléctrica se refiere, en relación con las centrales de potencia superior a los 10.000 kw. Como es lógico, procede advertir que, para un estudio definitivo, es preciso considerar todos los factores que concurren en cada caso particular, antes de tomar una decisión, por lo que, repito, que se trata sólo de un estudio teórico que nos dé idea de conjunto de las posibilidades de renovación de las térmicas mediante el ciclo de mercurio.

En el Cuadro núm. 7 se han recogido los datos correspondientes a las centrales termoeléctricas españolas, emplazadas en la Península, y con potencia superior a 10.000 kw., de conformidad con la información recogida por el Sindicato Vertical de Agua, Gas y Electricidad para el año 1948, a excepción de los relativos a la potencia calorífica de los combustibles, que se han deducido con respecto a las cifras de años anteriores.

En el mencionado Cuadro núm. 7 se han reservado sus dos últimos apartados para considerar las potencias y producciones totales que podrían obtenerse al renovarlas con el ciclo binario de mercurio, si bien se ha prescindido en ellos de cuatro centrales, unas, por encontrarse todavía en bastante buen estado y obtener consumos aceptables específicos aceptables, las otras por haber sido ampliadas recientemente. Como se observa por las cifras totales recogidas, la potencia termoeléctrica podría ser aumentada hasta algo más de 300.000 kw., lo que supone un 55 por 100 sobre la potencia real máxima obtenida en 1948, con una producción de más de 1.500 millones de kilovatios-hora, o sean, más de dos y media veces la producción de los mismos en el citado año, para lo cual se ha tomado una utilización de unas 5.000 horas, cifra algo elevada, pero que presumo posible después de la renovación y dadas las circunstancias actuales del mercado eléctrico nacional.

La ampliación prevista, que es del orden de los 140.000 kw., presupondría unas necesidades iniciales







de 1.000 a 1.300 Tm. de mercurio; cifra ésta que no distorsionaría en absoluto nuestra producción de este metal, pues equivale, aproximadamente, a la diferencia entre la producción actual y la máxima posible; es decir, que incluso podría ser cubierta en un año. Si consideramos como pérdidas máximas el 2 por 100 anual, obtendríamos que sólo serían necesarias unas 26 Tm. anuales de mercurio para atender a ello.

### CONCLUSIONES

- 1.<sup>a</sup> Una vez terminen de entrar en servicio las nuevas centrales térmicas españolas, es sumamente urgente renovar algunas de las antiguas, y evitar así la deficiente utilización de nuestros combustibles en bien de la economía general del país.
- 2.<sup>a</sup> Por ser España el primer país productor de mercurio y, teniendo muy presentes las ventajas indudables del ciclo binario mercurio-vapor de agua, en su aplicación a las centrales termoeléctricas, es para nosotros un deber ampliar algunas de las antiguas centrales mediante este ciclo mixto, sancionado ya por la práctica en Norteamérica.
- 3.<sup>a</sup> Para la mejor realización de tal proyecto creemos que, bajo la protección del Consejo de Administración de las Minas de Almadén y Arrayanes, con la colaboración de Unidad Eléctrica Española y del Instituto Nacional de Industria, y contando con la asistencia del Ministerio de

Industria y Comercio, a través de la Dirección General de Industria, debe designarse una o más centrales que, por sus características y condiciones actuales, sean las más adecuadas para su ampliación, según el ciclo citado.

- 4.<sup>a</sup> De existir dificultades económicas para la realización de tales proyectos, tanto las Minas de Almadén y Arrayanes como el Instituto Nacional de Industria, deberían buscar una fórmula que hiciese posible el desarrollo de las ampliaciones previstas.
- 5.<sup>a</sup> Las centrales así renovadas podrían ser magnífico índice de nuestra industrialización e indudable reclamo técnico, dentro del campo de las aplicaciones del mercurio, abriéndose a éste nuevos mercados mundiales en beneficio también de nuestra minería.

Madrid, marzo 1950.

### APENDICE

Después de ultimado el presente trabajo, se reciben noticias de Norteamérica según las cuales se han puesto en servicio recientemente tres nuevas turbinas de vapor de mercurio de tipo unificado y con potencia de 7.500 kw., que confirman los resultados anteriores sobre la eficiencia del ciclo mixto pues reducen al propio tiempo su coste y eliminan algunos pequeños problemas de explotación relacionados con las mismas, lo que hace cada día más aconsejable la renovación y ampliación de las antiguas centrales térmicas.

---

---

*Después de breve intervención del señor Vimoso, apruébanse las conclusiones que el autor presenta como resumen de su trabajo, que fué objeto de grandes elogios por los presentes.*

*Concedido el uso de la palabra al señor Soler de Agustín, lee el trabajo n.º 200.*







## N.º 200.-Aumento del coeficiente de utilización de las centrales hidroeléctricas mediante el aprovechamiento de la energía en horas de madrugada

Autor: D. ENRIQUE SOLER DE AGUSTÍN

Ingeniero Industrial

En las centrales hidroeléctricas, cuya producción se destina principalmente a consumos públicos, no suele aprovecharse toda la energía capaz de producir sus generadores durante las horas de madrugada, por descargarse mucho la red en dichas horas, lo que determina una disminución del coeficiente de utilización de estas centrales en circunstancias normales.

En centrales a pie de presa, la disminución de producción por la causa expuesta, puede estar justificada al traducirse en una economía o almacenamiento de agua en el embalse, para gastarla en horas de punta o máximo consumo, pero en las centrales hidroeléctricas que utilizan caudal constante, sin posible almacenamiento de agua, como son los saltos sin embalse o depósito regulador, tiene gran importancia aprovechar de modo continuo todo el caudal durante las veinticuatro horas del día, sin verter agua de noche al río, y elevar, así, su coeficiente de utilización, que suele ser de 0,5 en estas centrales, hasta 0,7 ó 0,8; la energía sobrante puede emplearse a dicha hora en instalaciones o industrias convenientes, con jornada de

trabajo nocturno (de once noche a siete mañana), capaces de absorber este excedente de fuerza; industrias a las que debía prestarse mayor atención, precisamente por ser las que pueden contribuir al aprovechamiento integral de la energía en los saltos actuales y los que están en construcción.

Muchas empresas eléctricas en circunstancias normales, y aun con escasez de energía durante el día y primeras horas de la noche, tienen latente el problema de la colocación del excedente de su fuerza desde las once de la noche hasta las siete u ocho de la mañana. Han resuelto algunas este problema mediante la instalación de industrias anexas, filiales, en muchas ocasiones, de la misma empresa productora de electricidad, que consumen este excedente, con lo que aumentan así, notablemente, el rendimiento de sus explotaciones. Pero, el problema general de utilizar energía normalmente sobrante en horas de madrugada tiene gran importancia, si se tiene en cuenta que, al bajar la carga de la red en dichas horas, por lo menos a 1/3 de la normal, el excedente de fuerza pue-



de representar como mínimo  $\frac{2}{3}$  de la carga media que lleve la red durante las dieciséis horas restantes del día, es decir, aproximadamente

$$\frac{\frac{2}{3} \times 8}{24} = 0,22 \text{ de la producción.}$$

Si se rebaja prudencialmente este coeficiente hasta 0,15, al tener en cuenta la producción excluida correspondiente a centrales térmicas y a pie de presa, resulta, que para una producción necesaria hoy día en España, aproximadamente de siete mil millones de kilovatios-hora, podrían aprovecharse, además,

$$\frac{7 \times 10^9}{1 - 0,15} - (7 \times 10^9) = 1,23 \times 10^9 \text{ kilovatios-hora}$$

es decir, cifras del orden de mil millones de kilovatios-hora, que podrían consumirse en industrias adecuadas, y aumentando así la producción hidroeléctrica y, por consiguiente, el rendimiento de los saltos, sin necesidad para ello de acrecer, en algunos casos, su potencia, aunque dicho aumento de rendimiento fuese independiente del incremento de producción necesaria hoy día para hacer frente al aumento normal de consumo, que únicamente puede conseguirse con la puesta en servicio de las nuevas centrales en contrucción.

Existen actualmente muchas empresas de energía eléctrica que tienen colocada durante el día toda la energía que puedan producir, en abonados de fuerza motriz y usos domésticos, y durante las primeras horas de la noche, en abonados de alumbrado, pero que podrían incrementar el rendimiento de sus explotaciones, como se indica anteriormente, si establecieran industrias filiales que trabajasen de once noche a ocho mañana, y obtuviesen, a dichas horas, productos y primeras materias necesarias, a su vez, para el desenvolvimiento de otras industrias.

A continuación se exponen algunas instalaciones e industrias cuya explotación podría ser interesante, a base de consumir energía eléctrica sobrante normalmente de noche.

#### HORNOS ELÉCTRICOS PARA FABRICAR CARBURO O FERROALEACIONES

El rendimiento de estos hornos, si trabajan de modo continuo, es decir, de ocho o nueve horas diarias

durante la madrugada, es, naturalmente, inferior al rendimiento obtenido con funcionamiento continuo, por las pérdidas de calorías durante las paradas, pero no imposibilita su empleo en estas condiciones, siempre que pueda compensarse la disminución del rendimiento con la economía en el precio de la energía, por tratarse de fuerza normalmente sobrante.

Si suponemos un horno eléctrico de 2.000 kw. y arco a 1.000 voltios, para fabricar carburo de calcio, que trabaje de modo discontinuo, con tres hornadas diarias de tres horas de duración cada una (once noche a ocho mañana), y que el rendimiento baje, debido al enfriamiento durante las paradas, a 6,4 kilovatios-hora de consumo por kg. de carburo fabricado, podría obtenerse con el mismo, trabajando en estas condiciones, una producción diaria de unas 2,8 toneladas de carburo, con un consumo de 18.000 kw-h. por día, tomados de la red únicamente en las horas que ésta suele descargarse, si se encuentra para ello con un precio reducido del kw-h. en dichas horas, y siendo nacionales en este caso todas las primeras materias necesarias, como son carbón, caliza y energía eléctrica sobrante del consumo público.

#### CALDERAS ELÉCTRICAS PARA PRODUCCIÓN DE VAPOR

El rendimiento de estas calderas eléctricas del tipo de electrodo de cobre sumergido en agua, que trabajen con corriente trifásica a 3.000 voltios, suele ser de 1,2 kgs. de vapor-hora por cada kilovatio-hora de consumo. Como el rendimiento de las calderas de vapor que queman carbón suele ser de 6 kgs. de vapor-hora por cada kg. de carbón quemado, resulta un equivalente de 5 kilovatios-hora, en substitución de cada kg. de carbón. Considerando un precio aproximado de 0,40 ptas., kg. de carbón en destino, resultaría ventajosa hoy día la instalación de calderas eléctricas para producir vapor, siempre que el precio del kilovatio-hora no excediese de 0,08 ptas., precio al que sólo puede llegarse con energía sobrante durante las horas de madrugada, por estudio en cada caso particular en el que se tome en cuenta el coste y amortización de la instalación.

Lo anterior puede tener interés en fábricas que necesitan una producción de vapor continua (destilerías, etcétera), ya que, si se instala una caldera eléctrica para



producir vapor, complementaria de la caldera de carbón, podría economizarse aproximadamente un 30 por 100 del consumo diario de carbón, si se aprovecha, para ello, energía hidroeléctrica que suele perderse.

Supongamos una fábrica que necesite 2.500 kgs. vapor-hora durante las veinticuatro horas del día; es decir, 60 toneladas diarias de vapor. Su consumo anual sería del orden de 3.600 toneladas, pero, si instalamos una caldera eléctrica de 2.000 kw., además de la de vapor, y se utiliza la eléctrica únicamente de once noche a siete mañana (cargando algo la de carbón durante dichas horas para evitar un enfriamiento excesivo), podrían economizarse al día, aproximadamente, tres toneladas de carbón, que se aprovecharían en otros usos, tomando de la red unos 16.000 kw.-h. diarios, solamente de once noche a siete mañana, que a un precio reducido durante dichas horas, podría ayudar a aumentar el número de horas de utilización de las centrales hidroeléctricas de la empresa suministradora y llegar a resultados bastante favorables, en particular, si la industria que consumiese dicho vapor producido con energía sobrante, fuese instalada como explotación anexa por la propia empresa productora de electricidad, al utilizar así un excedente normal de su producción.

### INSTALACIÓN DE CÉLULAS ELECTROLÍTICAS

Otra aplicación de la energía disponible en horas de madrugada es en instalaciones de células electrolíticas, si eligiendo éstas del tipo que puedan trabajar de modo discontinuo (once noche a ocho mañana, como máximo), como son, por ejemplo, las de diafragma poco permeable para obtener cloro y sosa cáustica diluida, sin circulación del líquido durante la electrolisis.

Suponiendo una instalación de 400 kilovatios, formada por 33 células de 2.500 amperios a cuatro voltios, para fabricar cloro y sosa cáustica diluida, y contando con un rendimiento bajo para estas células, a trabajar en estas condiciones, es decir, del orden de cuatro kilovatios-hora por kg. de cloro y 1,25 kgs. de sosa diluida, con un consumo diario aproximado de 3.200 kilovatios-hora, tomados de la red a bajo precio, en horas que no se necesitan para el consumo público, podrían obtenerse unos 800 kgs. de cloro al día y una

tonelada de sosa cáustica diluida, con las primeras materias necesarias nacionales, o sea, cloruro sódico y energía eléctrica que normalmente no se aprovecha.

### GRUPOS CONVERTIDORES PARA CARGAR BATERÍAS

La carga de baterías de acumuladores eléctricos durante las horas de madrugada puede tener importancia en el porvenir si se llegan a implantar servicios de transportes urbanos en ciudades pequeñas, a base de autobuses eléctricos accionados por baterías de acumuladores que se cargarán a dichas horas, puede darse una carga complementaria a estas baterías de doce a dos tarde, horas en las que también suele descargarse algo la red. Lo anterior también puede tener interés para servicios municipales de limpieza, a base de pequeños vehículos accionados por motor eléctrico y baterías de acumuladores.

Un autobús eléctrico accionado por baterías de tipo normal, o sea, con motor de 6 CV., peso tres toneladas y capacidad para 28 viajeros, tiene una autonomía de 60 kms. con cada carga de batería, y necesita 8 kw. de potencia para cargar cada una de éstas.

Cada carga de batería, durante diez horas, como máximo, representa un consumo de 80 kw.-h., lo que supone un gasto aproximado de 1,3 kw.-h. por kilómetro recorrido. El sistema de transporte anterior puede ser interesante en pequeñas ciudades, ya que con cada carga de batería pueden hacerse 12 viajes de ida y vuelta en un trayecto de 2,5 kms., es decir, una frecuencia de servicio de un viaje cada hora, a base de las velocidades pequeñas que hacen dichos vehículos.

La ventaja principal de este sistema de transporte para pequeñas distancias es que la carga de las baterías puede hacerse, precisamente, en horas de madrugada, cuando están los vehículos fuera de servicio, y por tanto, consumiendo energía sobrante a dichas horas, con el consiguiente ahorro de carburante, y ser nacionales tanto los vehículos y baterías como la procedencia de su fuerza motriz.

### HORNOS ELÉCTRICOS PARA PANADERÍAS

Otra indicación interesante para utilizar la energía en horas de madrugada es la instalación de hornos



eléctricos para fabricar pan, ya que la elaboración de éste suele hacerse, normalmente, a dichas horas.

Para la elaboración de 1.000 kgs. de pan en ocho horas (ocho sacas de harina), se necesita un horno de 30 K. V. A., unos 27 kw., con  $\cos \varphi = 0,9$ , es decir, un consumo diario de unos 200 kw.-h. (no se necesita trabajar a plena carga todo el tiempo), y para elaborar la misma cantidad de pan se necesita quemar unos 320 kgs. de leña en un horno corriente, luego el equivalente en este caso viene a ser kilovatio-hora por 1,6 kgs. de leña. Si el precio de la leña es de 0,1 pesetas kilo, podría ser interesante la instalación de hornos eléctricos con el expresado fin en la mayor parte de las panaderías, siempre que el precio del kw.-h. no sobrepase de 0,30 pesetas, contribuyendo así en parte al mejor aprovechamiento de la energía disponible en los saltos durante la madrugada, y se economizaría así combustible para otros fines.

### TERMOS ELÉCTRICOS

Otra aplicación, aunque secundaria, de la energía eléctrica disponible en horas de madrugada, es la de su consumo en termos eléctricos para baños, etc., con contadores de doble tarifa, que permitan facturar kw.-h. consumidos a dichas horas a un precio reducido, para calentar el agua, aprovechando estas calorías durante el día. Se contribuye así a la electrificación doméstica y puede generalizarse el uso de tales termos para baños, etc., en estas condiciones.

### POSIBILIDAD DE MEJORAR LA EXPLOTACIÓN DE LAS EMPRESAS PRODUCTORAS Y DISTRIBUIDORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA, SI SE AUMENTA EL NÚMERO DE HORAS DE UTILIZACIÓN DE SUS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS, MEDIANTE EL CONSUMO EN INDUSTRIAS ANEXAS DE LA ENERGÍA NORMALMENTE SOBRANTE EN HORAS DE MADRUGADA

Si suponemos una empresa productora y distribuidora de electricidad con una potencia instalada en una central hidroeléctrica de 12.000 K.V.A., por ejemplo, alimentada con agua procedente de un río con embalse regulador en cabeza, que permita disponer de un caudal mayor o menor, según las épocas del año y los períodos de sequía, pero constante

en las veinticuatro horas del día, puede contarse con una producción normal al año del siguiente orden: (ver gráfico I).

MESES	Producción máxima mensual	Pérdidas en línea y transformadores alta	Producción máxima que podría utilizarse (en alta presión)
	Kw.-h.	Kw.-h.	Kw.-h.
Enero ... ..	5.760.000	648.000	5.112.000
Febrero ... ..	5.616.000	612.000	5.004.000
Marzo ... ..	5.400.000	576.000	4.824.000
Abril ... ..	5.040.000	540.000	4.500.000
Mayo ... ..	4.320.000	504.000	3.816.000
Junio ... ..	3.528.000	396.000	3.132.000
Julio ... ..	3.096.000	360.000	2.736.000
Agosto ... ..	2.952.000	324.000	2.628.000
Septiembre ... ..	2.952.000	324.000	2.628.000
Octubre ... ..	3.816.000	396.000	3.420.000
Noviembre ... ..	5.112.000	504.000	4.608.000
Diciembre ... ..	5.688.000	648.000	5.040.000
TOTAL ANUAL ... ..	53.280.000	5.832.000	47.448.000
			Kw.-h.
Producción utilizable máxima teórica ... ..			47.448.000
Destinado a consumos públicos con abono de fuerza motriz, usos domésticos y alumbrado (68 %).			32.264.640
Diferencia o energía sobrante, principalmente durante las horas de madrugada (32 %) ... ..			15.183.360

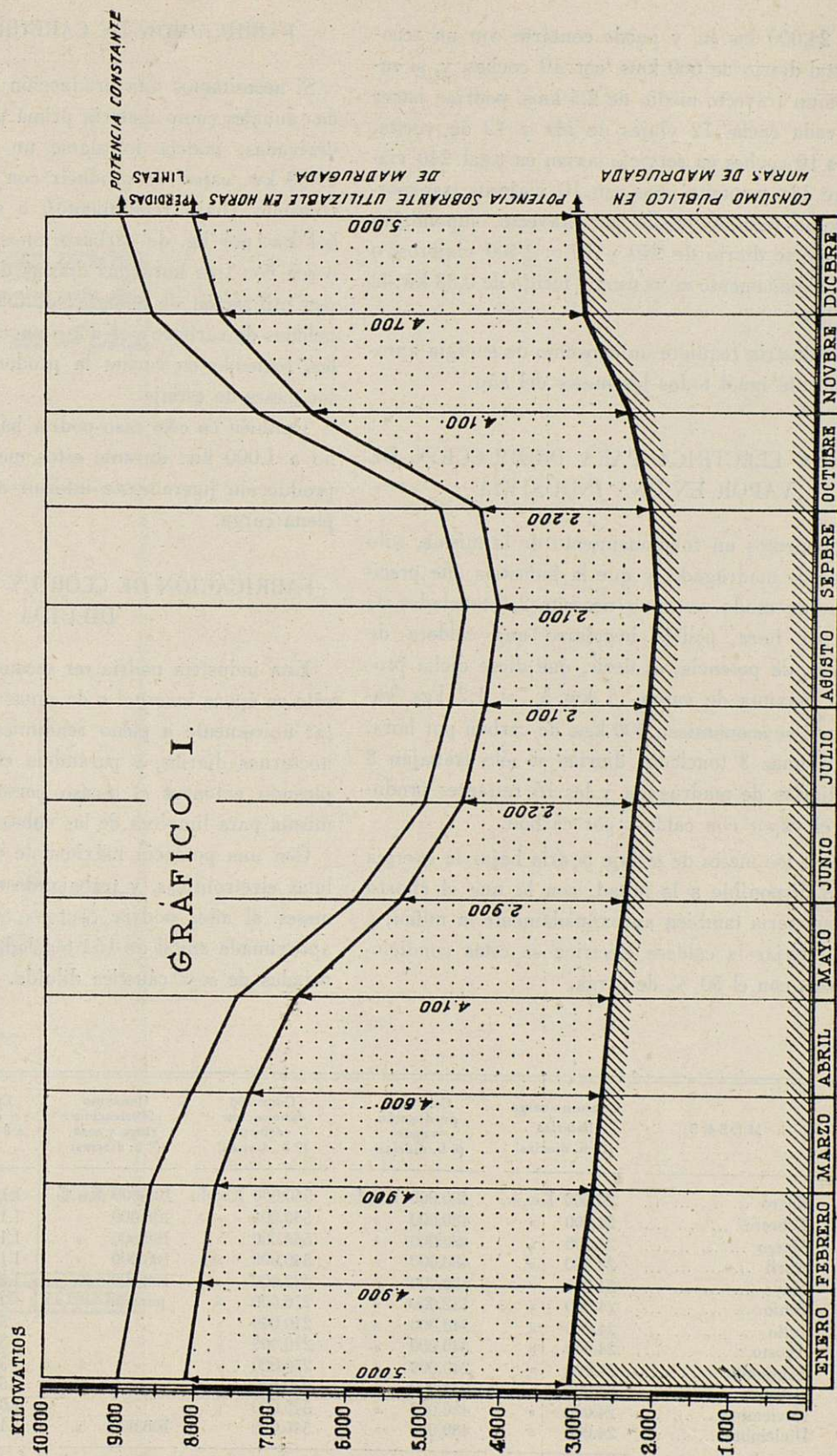
La energía sobrante anterior, repartido entre 365 días a razón de ocho horas diarias (once noche a siete mañana), representaría, teóricamente, una potencia media sobrante a dichas horas de 5.199 kw., pero teniendo en cuenta que no toda la energía perdida sobra precisamente de once noche a siete mañana, sino que un 13 ó 14 % de esta potencia suele sobrar de doce a dos tarde, coincidiendo con la parada normal de la industria, y de seis a ocho tarde en verano, cuando no coincide el trabajo de la industria con el alumbrado, podría contarse aproximadamente con una potencia máxima disponible en horas de madrugada en el salto de agua indicado, del orden de 4.500 kw. que podrían utilizarse, por ejemplo, en cuatro industrias, repartiendo esta potencia nocturna disponible del siguiente modo:

### EMPRESA DE TRANSPORTES URBANOS EN CIUDAD PEQUEÑA

Carga diaria de 10 baterías para los 10 autobuses eléctricos en servicio que tuviese la empresa de transportes, lo que representaría un consumo diario de 80 kw.  $\times$  10 horas = 800 kw.-h. y mensual del or-



*Gráfico de potencias normales en un salto que utilice caudal constante con 12.000 KVA. (9600.) por ejemplo, de potencia instalada y potencias sobrantes aprovechables en horas de madrugada (11 noche a 8 mañana) que suele dejar libre para otros consumos el servicio público normal de alumbrado y fuerza*



NOTA: Se supone que el salto anterior tiene agua regulada durante el estiaje mediante embalse regulador en la cabecera del río.



den de 24.000 kw.-h., y puede contarse con un recorrido total diario de 600 kms. con 10 coches, y, si suponemos un trayecto medio de 2,5 kms. podrían hacer al día cada coche 12 viajes de ida y 12 de vuelta. Para los 10 coches en servicio serían en total 240 viajes entre ida y vuelta, que con 10 viajeros transportados como término medio por trayecto, supondrían un transporte diario de  $240 \times 10 = 2.400$  viajeros, o sea aproximadamente un consumo medio de 0,33 kw.-h. por viajero.

Esta industria requiere un consumo de energía aproximadamente igual todos los meses del año.

### CALDERA ELÉCTRICA PARA PRODUCCIÓN DE VAPOR EN UNA INDUSTRIA

Si suponemos un funcionamiento de la misma, sólo en horas de madrugada, y que la industria que precise vapor de modo continuo necesite 2,4 toneladas de vapor por hora, podría instalarse una caldera de 2.000 kw., de potencia, es decir, que diese dicha producción máxima de vapor (1 kw.-h. = 1,2 kgs./vapor/hora), se economizan 400 kgs. de carbón por hora, es decir, unas 3 toneladas diarias si sólo trabajan 8 horas diarias de madrugada y las 16 restantes produciendo el vapor con caldera por carbón.

Durante los meses de estiaje podría bajar la energía eléctrica disponible a la mitad, con lo que el ahorro de carbón sería también aproximadamente la mitad, y puede trabajar la caldera eléctrica en estas condiciones, o sea, con el 50 % de carga.

### FABRICACIÓN DE CARBURO DE CALCIO

Si necesitamos una producción de unas 800 toneladas anuales como materia prima para otras industrias derivadas, podría instalarse un horno eléctrico de 2.000 kw. capaz de producir con funcionamiento discontinuo (bajo rendimiento), o sea un consumo de 6,4 kw. por kg. de carburo, unos 312 kgs. por hora, o sea con tres hornadas diarias de 3 horas cada una, con utilización de energía sobrante de noche, 2,8 toneladas de carburo por día o unas 800 toneladas anuales, teniendo en cuenta la producción mitad durante los meses de estiaje.

También en este caso podría bajar la carga del horno a 1.000 kw. durante estos meses, a costa de una producción ligeramente inferior a la mitad que la de plena carga.

### FABRICACIÓN DE CLORO Y SOSA CÁUSTICA DILUÍDA

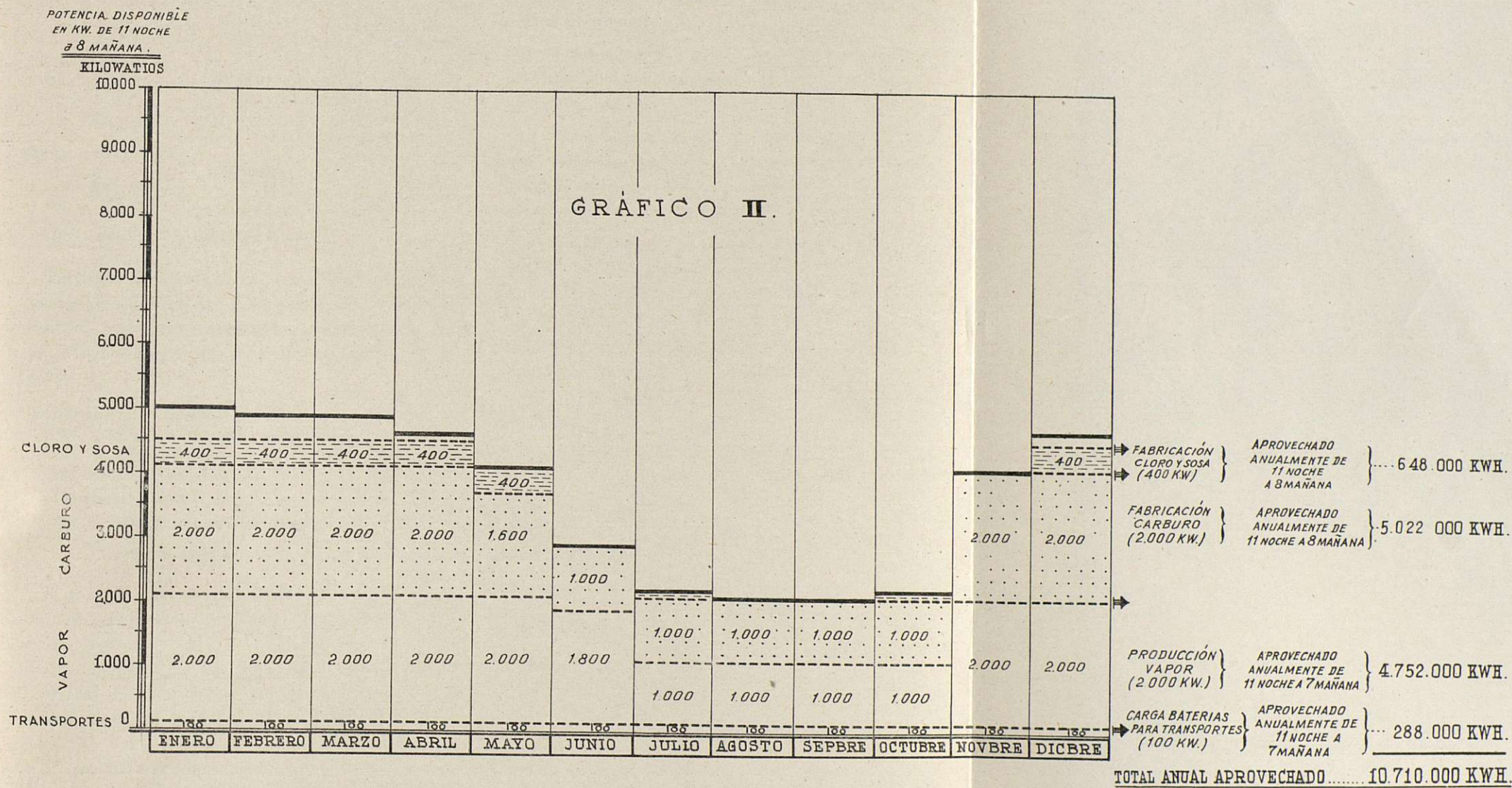
Esta industria podría ser secundaria para funcionar sólo en época invernal o de aguas abundantes, o trabajar únicamente a pleno rendimiento durante 9 horas nocturnas diarias, y parándola el resto del año, empleando entonces el escaso personal necesario en la misma para limpieza de las cubas.

Con una potencia máxima de 400 kw. para las células electrolíticas, y trabajando a plena carga sólo 6 meses al año, podría contarse con una producción aproximada anual de 162 toneladas de cloro y 203 toneladas de sosa cáustica diluída.

MESES	Consumo carga baterías (10 h. diarias)	Consumo producción vapor (8 h. diarias)	Consumo fabricación carburo (9 h. diarias)	Consumo fabricación cloro y sosa (9 h. diarias)	Consumo total de 11 noche a 8 mañana como máximo
Enero ... ..	24.000 Kw.-h.	480.000 Kw.-h.	540.000 Kw.-h.	108.000 Kw.-h.	1.152.000 Kw.-h.
Febrero ... ..	24.000 »	480.000 »	540.000 »	108.000 »	1.152.000 »
Marzo ... ..	24.000 »	480.000 »	540.000 »	108.000 »	1.152.000 »
Abril ... ..	24.000 »	480.000 »	540.000 »	108.000 »	1.152.000 »
Mayo ... ..	24.000 »	480.000 »	432.000 »	108.000 »	1.044.000 »
Junio ... ..	24.000 »	432.000 »	270.000 »	parada	726.000 »
Julio ... ..	24.000 »	240.000 »	270.000 »	»	534.000 »
Agosto... ..	24.000 »	240.000 »	270.000 »	»	534.000 »
Septiembre ... ..	24.000 »	240.000 »	270.000 »	»	534.000 »
Octubre ... ..	24.000 »	240.000 »	270.000 »	»	534.000 »
Noviembre... ..	24.000 »	480.000 »	540.000 »	»	1.044.000 »
Diciembre ... ..	24.000 »	480.000 »	540.000 »	108.000 »	1.152.000 »
TOTAL ANUAL ...	280.000 Kw.-h.	4.752.000 Kw.-h.	5.022.000 Kw.-h.	648.000 Kw.-h.	10.710.000 Kw.-h.



*Gráfico de potencias sobrantes normalmente aprovechables durante horas de madrugada en los distintos meses del año y su posible distribución con el salto anterior en 4 industrias que trabajen solo a dichas horas.*









En el cuadro que precede se especifican los consumos previstos en horas de trabajo nocturno para las cuatro instalaciones anteriores, en los distintos meses del año (ver gráfico II):

Los anteriores consumos de fuerza sobrante, en las cuatro industrias indicadas, podrían representar lo siguiente:

En transportes urbanos ... ..	= 238.000 Kw.-h.	× 3 = 864.000 viajes-ros transportados.
En producción de vapor ... ..	= 4.752.000 Kw.-h.	× 1,2 = 5.702.400 kilogramos vapor/hora (equivalente a un consumo de 750 toneladas de carbón).
En producción de carburo ... ..	= 5.022.000 Kw.-h.	× 0,156 = 780.343 kilogramos de carburo de calcio.
En producción de cloro ... ..	= 648.000 Kw.-h.	× 0,25 = 162.000 kilogramos de cloro.
En producción de sosa ... ..		× 0,31 = 200.880 kilogramos de sosa cáustica diluída.
TOTAL ANUAL ... ..	10.710.000 Kw.-h.	

Partiendo de la base de que estas industrias podrían establecerse siempre que la capacidad de absorción del mercado permitiese consumir los productos obtenidos, se podrían conseguir los siguientes ingresos aproximados:

864.000 viajeros transportados a 0,50 ... ..	432.000 ptas.
5.702 toneladas de vapor/hora (equivalentes a 750 toneladas de carbón) ... ..	270.000 »
780 toneladas de carburo de calcio ... ..	1.560.000 »
162 toneladas de cloro ... ..	259.200 »
200 toneladas de sosa cáustica diluída ... ..	180.000 »
INGRESO TOTAL PREVISTO ... ..	2.701.200 ptas.

Si se estima que los gastos de explotación de estas instalaciones representan como término medio un 63 % de los ingresos obtenidos (incluidas amortizaciones), podría obtenerse un beneficio anual aproximado de 1.000.000 de ptas., lo que permitirá emplear en las mismas hasta un capital global de 10.000.000 de pesetas.

El ejemplo anterior de unas industrias que aprovechan sólo energía normalmente sobrante de noche, para reducir consumos de combustibles (gasolina, carbón, etcétera) y fabricar productos a su vez necesarios para el desenvolvimiento de otras industrias, que contribu-

yen, además, al aprovechamiento integral de la energía hidroeléctrica disponible en los saltos existentes, puede ser interesante en determinadas industrias y circunstancias, y debe estimularse el consumo de energía en estas condiciones, previo un estudio técnico y económico en cada caso.

## VENTAJAS E INCONVENIENTES DERIVADOS DEL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN HORAS DE MADRUGADA

Las principales ventajas de utilizar energía eléctrica en estas condiciones son:

1.<sup>a</sup> Posibilidad de tarifas especiales para los consumos de fuerza exclusivamente de 11 noche a 8 mañana, como máximo.

2.<sup>a</sup> Contribuir a la mejor utilización de las centrales hidroeléctricas de caudal constante y, por consiguiente, al mejor aprovechamiento de los recursos naturales de que dispone España.

3.<sup>a</sup> Ahorro de carbón y de otros combustibles en industrias que se presten a ello, sobre todo en las que precisen de modo continuo calor, vapor, etc., que podría obtenerse a dichas horas mediante instalaciones complementarias que consumiesen energía eléctrica.

4.<sup>a</sup> Obtener mejores rendimientos económicos en determinadas industrias que se presten a utilizar energía eléctrica de noche, como panaderías, etc., con precios especiales para el kw.-h. suministrado en dichas condiciones, además del consiguiente ahorro de combustible.

Ante las ventajas anteriores se presentan los siguientes inconvenientes:

1.<sup>o</sup> En determinados casos, como en los hornos eléctricos para fabricar carburo de calcio o acero, puede bajar bastante el rendimiento de estos hornos con trabajo discontinuo, debido al enfriamiento de los mismos durante las horas diurnas de parada, pero este inconveniente puede compensarse si se consigue un precio ventajoso para el kw.-h. suministrado de madrugada.

2.<sup>o</sup> Escaso rendimiento del personal que trabaje de noche, pero este inconveniente puede subsanarse en parte si se preparan durante el día las primeras materias necesarias, etc., y se deja reducido el personal al



mínimo posible, en muchos casos, sólo de vigilancia, como electrólisis, carga de baterías, etc., y aunque esté mejor retribuido el trabajo en estas condiciones, no se gravará con ello la producción, por tratarse de industrias que necesitan poco personal, y en las de trabajo continuo no se necesitaría, en la mayoría de los casos, aumentar el mismo.

3.º Si se trata de industrias que trabajen en competencia con otras similares, de funcionamiento continuo, podría encarecerse la producción con un funcionamiento discontinuo, sólo 9 horas diarias como máximo, pero el inconveniente anterior podría amiorarse bastante con protección oficial adecuada para esta clase de industrias, como a continuación se indica.

#### NECESIDAD DE PROTECCIÓN OFICIAL PARA LAS INDUSTRIAS QUE CONSUMAN NORMALMENTE ENERGÍA ELÉCTRICA DE 11 NOCHE A 8 DE LA MAÑANA

Por tratarse de industrias que pueden contribuir notablemente al aprovechamiento integral de la energía hidroeléctrica, y ahorrar en muchos casos consumo de carbón y de otros combustibles, debía otorgarse protección oficial a tales industrias, y crear un organismo ordenador de las mismas, clasificadas en los dos grupos principales siguientes:

a) Industrias o instalaciones que consuman energía exclusivamente de 11 noche a 8 de la mañana, clasificadas como «PREFERENTES» para los expresados fines.

b) Industrias o instalaciones que consuman energía eléctrica de 11 noche a 8 de la mañana, además de otras horas.

Esta protección oficial está en parte justificada, ya que del mismo modo que se ha concedido la declaración de «absoluta necesidad nacional» para los nuevos saltos en construcción, debía concederse protección oficial para las industrias o instalaciones que contribuyan al aprovechamiento integral o utilización máxima de la energía que pueda generarse en los mismos.

La protección oficial a través del organismo ordenador de tales industrias podría ser:

a) Suministro oficial de los materiales precisos para su construcción, así como de las primeras materias necesarias para su funcionamiento, en particular, para

aquellas industrias o instalaciones que se pongan en servicio para consumir el excedente normal de fuerza de los nuevos saltos en construcción.

b) Reducción de impuestos y cargas respecto los que gravan normalmente industrias similares.

c) Coeficiente de reducción en las tarifas oficiales de consumo de energía eléctrica que puedan implantarse en su día, siempre que los consumos indicados se efectúen de 11 noche a 8 mañana, exclusivamente.

#### POSIBLE AUMENTO DEL RENDIMIENTO DE EXPLOTACIÓN DE EMPRESAS PRODUCTORAS Y DISTRIBUIDORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA, MEDIANTE LA IMPLANTACIÓN DE INDUSTRIAS ANEXAS QUE CONSUMAN EL EXCEDENTE DE FUERZA QUE A DETERMINADAS HORAS DEJA LIBRE EL CONSUMO PÚBLICO

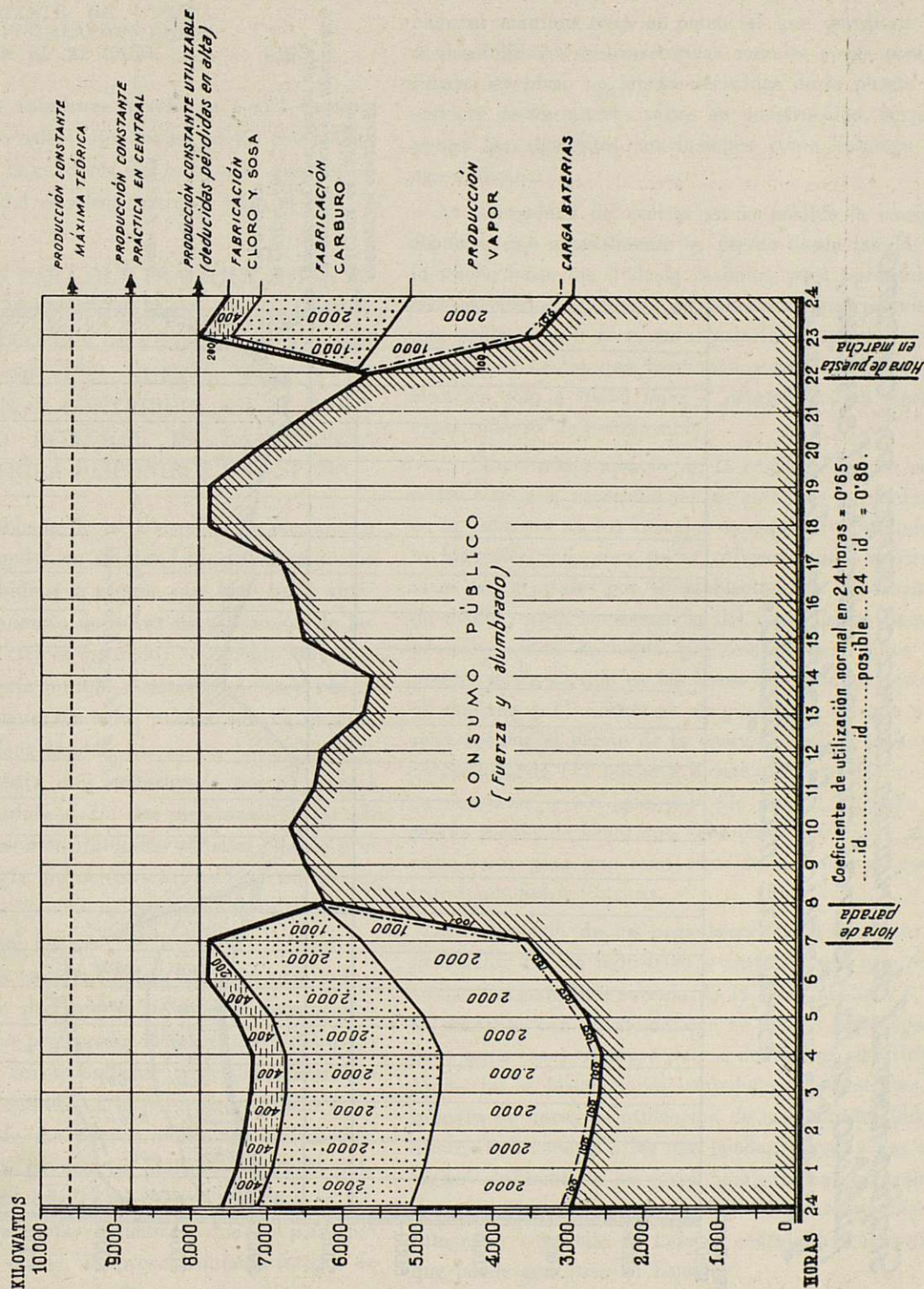
Aunque las industrias o instalaciones aludidas puedan implantarse por empresas particulares, como es el caso de los hornos eléctricos para panaderías, empresas de transporte por autobuses eléctricos con baterías, etc., podría ser interesante para muchas empresas productoras y distribuidoras de electricidad la implantación de tales industrias, o instalaciones, creadas para consumir sus excedentes de fuerza, constituyendo para ello empresas filiales o anexas de la propia empresa eléctrica, con participación directa en la fabricación obtenida. Se aumentaría con ello el rendimiento de explotación, en primer lugar, por colocar el excedente de su fuerza en horas de poco consumo en la red, y después, por obtener un beneficio con la fabricación de productos.

En el caso citado de una empresa hidroeléctrica con una potencia instalada de 12.000 K.V.A. (9.600 kw.). Si tiene el mercado capacidad de absorción para los productos fabricados (y esto debe ser cuidadosamente estudiado antes de montar tales instalaciones), podría aumentarse el coeficiente de utilización de las centrales hidroeléctricas y el rendimiento de explotación de esta empresa, del siguiente modo:

PRODUCCIÓN NORMAL (sin colocar el excedente de fuerza en horas de madrugada)...	32.264.640 kw.-h.
PRODUCCIÓN CON INDUSTRIAS ANEXAS QUE CONSUMAN FUERZA EXCEDENTE ...	42.974.640 »

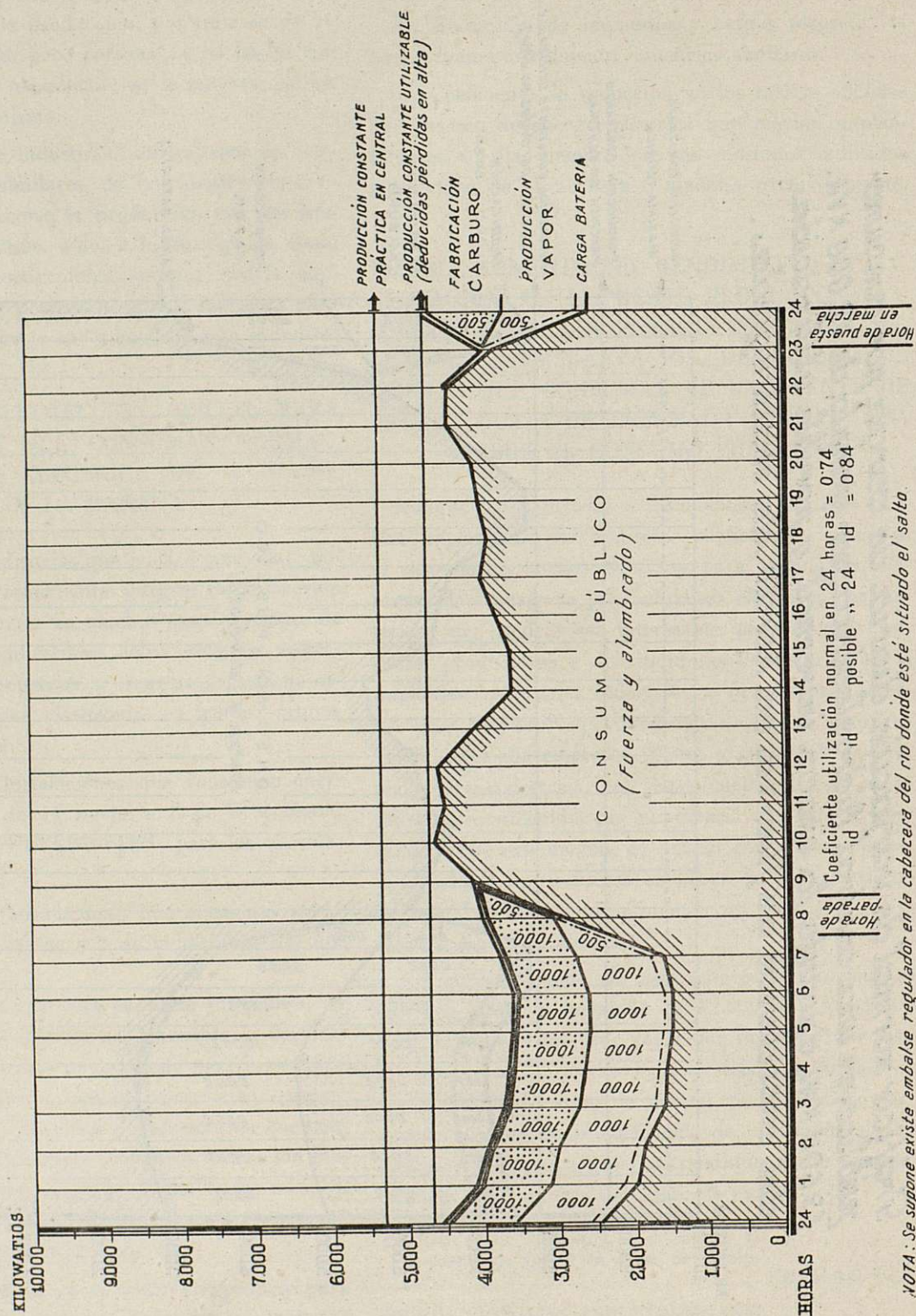


*Gráfico normal de variación diaria de carga, por consumo público, en una central hidroeléctrica, por ejemplo, de 12.000 KVA. (9.600 KW), durante la época invernal, y posible utilización del excedente de fuerza en horas de madrugada.*





*Gráfico normal de variación diaria de carga por consumo público en la central anterior, durante el estiaje, y posible utilización del sobrante de fuerza en horas de madrugada.*



NOTA: Se supone existe embalse regulador en la cabecera del río donde esté situado el salto



COEFICIENTE NORMAL DE UTILIZACIÓN DE LA INSTALACIÓN HIDROELÉCTRICA EN EL 1.<sup>er</sup> CASO ... 0,68

NUEVO COEFICIENTE DE UTILIZACIÓN DE LA INSTALACIÓN HIDROELÉCTRICA EN EL 2.<sup>o</sup> CASO ... 0,90

Los resultados anteriores se refieren a una empresa que tenga salto o saltos situados en un río con embalse regulador en la cabecera del mismo, lo que permitirá utilizar caudal constante durante todo el día.

#### PERSPECTIVAS PARA QUE TRABAJEN ESTAS INDUSTRIAS DE MODO CONTINUO EN EL PORVENIR POR UTILIZACIÓN DE FUERZA CONSTANTE PROCEDENTE DE LOS NUEVOS SALTOS EN CONSTRUCCIÓN, Y CONTRIBUIR ASÍ AL APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE LA ENERGÍA HIDROELÉCTRICA DISPONIBLE EN ESPAÑA

Aunque el problema de la colocación de energía en horas de madrugada no se sintió mucho durante los últimos años, debido a la sequía, que hizo subir automáticamente el número de horas de utilización de las centrales hidroeléctricas españolas, al quedar muy disminuída la potencia normal constante en los diversos meses del año, sigue, de todos modos, latente el problema de la colocación de fuerza en horas de madrugada, que tendrá más importancia por la cuantía de la energía perdida el día que se normalicen las adversas condiciones meteorológicas actuales para la producción de energía hidroeléctrica; normalidad que es de esperar se produzca, ya que los nuevos saltos se construyen con tal fin.

Como aliciente para la implantación de tales industrias, debe darse preferencia en todo momento, mediante la oportuna protección oficial a través del organismo ordenador correspondiente, para que puedan trabajar de modo continuo en el porvenir y utilizar energía procedente de los nuevos saltos en construcción cuando su puesta en marcha aumente de modo suficiente las disponibilidades de energía eléctrica en España. Contribuyen estas industrias, que en principio sólo trabajen de noche, al aprovechamiento íntegro de los nuevos saltos, o sea, de la potencia constante que sean capaces de dar en todo momento.

#### CONCLUSIONES

Dada la importancia, cada día mayor, de aprovechar al máximo todo el potencial que permitan las disponibilidades hidroeléctricas actuales y las posibilidades en plazo no lejano derivadas de la puesta en servicio de los nuevos saltos en construcción, se proponen las siguientes conclusiones como resumen de este trabajo:

1.<sup>a</sup> Necesidad de utilizar en lo posible la energía eléctrica que normalmente se pierde desde las 11 de la noche hasta las 8 de la mañana, para aprovechar este excedente de fuerza en industrias que permitan esta utilización, o bien, en instalaciones anexas a industrias existentes que funcionan y consumen energía eléctrica sólo a dicha hora y determinen, en ciertos casos, ahorro de combustible.

2.<sup>a</sup> Con independencia de la construcción de centrales térmicas, necesidad de los embalses reguladores en la cabecera de los ríos que tengan aprovechamiento hidroeléctrico, para poder utilizar caudal constante en sus centrales por el establecimiento del reajuste de tarifas como consecuencia del coste de las nuevas presas y saltos, de modo que resulten recargados los precios de la energía en las horas de consumo normal (8 mañana a 11 noche) en un porcentaje tal que permita reducir el precio de la energía vendida en horas de madrugada (11 noche a 8 mañana), para estimular su consumo, y sin que por ello resulte afectado el precio medio de venta que debe tener hoy día el kilovatio-hora, para que sean rentables las nuevas construcciones hidroeléctricas.

3.<sup>a</sup> Creación de un organismo oficial protector y ordenador de las industrias o instalaciones que consuman normalmente energía de 11 de la noche a 8 de la mañana, con la ayuda que se estime conveniente para estos casos, siempre que se demuestre que dichas industrias o instalaciones contribuyen a aumentar el número de horas de utilización de las centrales hidroeléctricas existentes o las que puedan darse, y dar carácter preferente a su funcionamiento en determinadas circunstancias, por contribuir al aprovechamiento integral y constante de toda la energía hidroeléctrica que puede generarse en España.

Pamplona, mayo 1950.



*Se presta asentimiento a las conclusiones presentadas en el trabajo leído, con la salvedad establecida por el señor Redonet Maura, que expuso su criterio, de que si bien las normas que propugna para el aumento de rendimiento de las centrales eléctricas el señor Soler de Agustín eran interesantes, en determinadas condiciones locales, en el conjunto de la producción española era necesario tomar en consideración que en los momentos actuales no existían sobrantes de energía.*

*Seguidamente el Sr. Presidente interesa del señor Gotor Carrau, la lectura de la siguiente Memoria:*



## N.º 206. - Mejoramiento de las curvas de carga por sistema de mando centralizado

Autor: D. SANTIAGO GOTOR CARRAU

Ingeniero Industrial

EL MANDO A DISTANCIA EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ELECTRICIDAD.—El mando y la maniobra a distancia se refieren a la posibilidad de actuar desde una central de la red de distribución sobre todos los puntos de acometida, y ofrecen la ventaja de poder en todo momento adaptar la carga a los kw. disponibles. Es, pues, el principal objeto del telemando la mejora de las curvas de carga. En efecto, el rendimiento de una empresa de electricidad será tanto más elevado cuanto la potencia puesta a la disposición de los abonados y consumida por éstos se acerque lo máximo a la potencia nominal instalada o disponible y que el reparto de la carga sea lo más uniforme posible.

Para una central no de embalse, si la capacidad de producción es suficiente para cubrir la demanda máxima, pero insuficiente para cubrir las puntas de carga, que es lo que ocurre normalmente, habrá, desde luego, muchas horas durante el día en las cuales cantidades apreciables de energía hidráulica quedarán inutilizadas. Pero tenemos medios de acumular esta energía, por ejemplo, bajo la forma de calor. Esto es, precisamente, lo que se hace con los calentadores de

agua y aparatos similares que funcionan durante la noche o durante las horas de poca demanda. De aquí se deduce la necesidad de conectar y desconectar sistemáticamente los elementos calefactores de estos aparatos y escalonar sus horas de funcionamiento según las estaciones. También interesa tener en cuenta las horas de trabajo del alumbrado público particular, anuncios luminosos, hornos eléctricos, etc.

Las compañías de electricidad ofrecen energía en condiciones favorables a los consumidores que la utilicen en las horas de poca demanda. La administración de esta energía se efectúa normalmente mediante los contadores de doble o triple tarifa, cuyos dispositivos integradores funcionan de acuerdo con el horario previsto en los correspondientes relojes de contacto, de modo que, en algunos casos, se puede suprimir el suministro durante ciertas horas. Pero es prácticamente imposible mejorar la curva de carga, tanto diaria como periódica, por medio de relojes de contacto, dado que, no solamente el consumo, sino también la producción eléctrica, están sometidas a continuas fluctuaciones. Además, no existe semejanza alguna entre la curva de consumo y el gasto hidráulico del río. Un



sistema de este género presenta algunos inconvenientes; por ejemplo, rigidez en el horario, una vez se haya fijado éste, desequilibrio inevitable entre los relojes de tarificación, imposibilidad práctica de adaptar este horario a las fluctuaciones diarias de las curvas de carga de la red, etc. La tendencia actual es, pues, abandonar el mando por relojes de contacto individuales en favor de un mando centralizado desde un punto cualquiera de la red, (subestación, o, estación central).

Cuando se plantea la instalación de la telemaniobra debe determinarse, en primer lugar, si su introducción es racional o no. Esta cualidad dependerá, principalmente, del precio de los receptores, cuyo número, ya para una red de pequeñas dimensiones, alcanza rápidamente cantidad respetable. La construcción de uno de estos receptores debe, por lo tanto, ser de lo más sencillo, y su funcionamiento perfecto, para que los gastos de adquisición y manutención, así como de revisión, se reduzcan a la menor cantidad.

Un caso muy distinto es el que implica la maniobra a distancia de determinados órganos de explotación de las redes, tales como centrales automáticas, válvulas o compuertas, dispositivos para la puesta en paralelo, etc. El número de aparatos de un mismo tipo es entonces limitado y, a menudo, se reduce a un solo aparato. Este caso se presenta, por ejemplo, en la regulación a distancia de la tensión de la red en un punto determinado. Desde este punto de vista, es muy interesante el telemando, ya que el número constantemente en aumento de centrales que alimentan una misma red, así como las interconexiones entre redes vecinas, hacen que cada vez sea más imprescindible una comprobación rigurosa de la producción y reparto de energía. La vigilancia por medio de la telemedida y telemando de los factores potencia-frecuencia en una red complicada de interconexiones, es indispensable cuando el suministro de energía esté garantizado por varias empresas productoras cuyas redes estén interconectadas.

La realización práctica del sistema exige, naturalmente, algunas ventajas para el abonado, sobre todo para el que ya tiene contratos con las compañías, puesto que, con este sistema, se le van a intervenir las horas de trabajo de sus aparatos, etc., y, en cambio, recibirá el kwh. en mejores condiciones económicas.

OTRAS APLICACIONES. — El telemando proporcio-

na también interesantes servicios para el mando a distancia; por ejemplo, en la puesta en paralelo de baterías de condensadores a fin de mejorar el factor de potencia para la puesta fuera de servicio de ciertos transformadores de distribución por medio de sus interruptores automáticos, servicios de alarma, llamada individual de equipos para reparación de líneas, etc.

## SISTEMAS DE TELEMANDO

### 1. Principio.

Existen diversos sistemas, adoptados por diferentes casas constructoras en Europa y América, basados en la transmisión de impulsos a frecuencias medias. A continuación se expone el funcionamiento básico de dichos sistemas.

Cada operación de mando a distancia está asegurada por dos impulsos como mínimo, uno de conexión y otro de desconexión, y es el intervalo de tiempo comprendido estos dos impulsos lo que determina el mando en cuestión. Así, por ejemplo, 50 intervalos diferentes de impulsos permiten la acción de 50 mandos individuales; es decir, 25 dobles mandos de «conexión» y «desconexión». La combinación de varios impulsos permite, en caso de necesidad, obtener número múltiple de mandos.

Los impulsos son emitidos a una frecuencia audible única que ha sido escogida en una banda prácticamente sin armónicos de orden superior, de manera que toda perturbación debida a estos armónicos no es de temer. Estos impulsos son recogidos o detectados por «relés» receptores adecuados sintonizados a la frecuencia de transmisión elegida.

La transmisión de estos impulsos sobre la red puede ser realizada de diferentes maneras, según la naturaleza y constitución de la red.

Distinguimos la superposición de corrientes portadoras en monofásica o trifásica. La superposición en trifásica permite una transmisión universal, ya que los impulsos de mando pasan a través de los transformadores en la misma relación que la corriente normal a 50 períodos. La energía con frecuencia audible puede ser recibida, ya sea entre dos fases del sistema trifásico o entre una fase y el neutro.

La superposición de corrientes portadores puede efectuarse según la naturaleza de la red y las circunstancias particulares, en serie o en paralelo con relación



a las fuentes de corriente a 50 períodos. En los dos casos la conexión de los receptores es la misma. En nuestro caso optamos por el sistema de inyección en paralelo.

Para impedir el paso de la energía con frecuencia audible por las ramas de la red que no deban ser mandadas, al igual que en los generadores y en las baterías de condensadores destinadas a mejorar el factor de potencia, es necesario introducir en ciertos puntos de la red filtros tapones. Éstos están constituidos por condensadores y bobinas de «self» sintonizadas exactamente a la frecuencia audible de mando. Los filtros tapones deben preverse de manera que opongan una resistencia muy débil al paso de la corriente de 50 períodos. Tal filtro viene representado en el esquema de la página 252 con el número (16).

## 2. *Funcionamiento.*

El mando puede actuar de forma automática o a mano. Es decir, empleando un dispositivo de reloj horario con sus respectivos juegos de contacto, en un caso, y simplemente por medio de pulsadores, en el otro.

En el plano número 1 podemos ver el esquema de un conjunto de telemando automático, que nos da idea de las múltiples combinaciones que se pueden realizar, y a su izquierda hemos trazado un esquema básico muy simplificado con mando a mano por pulsadores que permita, al observarlo, aclarar cualquier dificultad referente al funcionamiento en general.

*P* es el pulsador de puesta en marcha. El «contactor» *sw* queda cerrado en seguida que se mueve el motor síncrono, y permanece cerrado hasta que el selector vuelve a la posición 0, después de una vuelta completa. Los pulsadores que accionan los contactos *b* actúan de forma que éstos quedan retenidos durante una vuelta completa.

Cuando se efectúa una operación de mando, se cierran los contactos respectivos y se originan las operaciones siguientes:

a) Puesta en servicio automática del grupo motor-generador.

b) Puesta bajo tensión de uno de los 50 «plots» del selector a motor.

c) Puesta en tensión del motor síncrono (8), que arranca y arrastra en su movimiento el brazo mó-

vil; desde el momento en que este último quita el contacto de arranque, la alimentación del motor queda asegurada directamente por la red a 50 períodos.

d) Puesta bajo tensión del «contactor» (9) por intermedio del brazo móvil y del «plot» de arranque del selector. Los contactos del «contactor» se cierran, y un primer impulso llamado «impulso de puesta en marcha» se produce en la red.

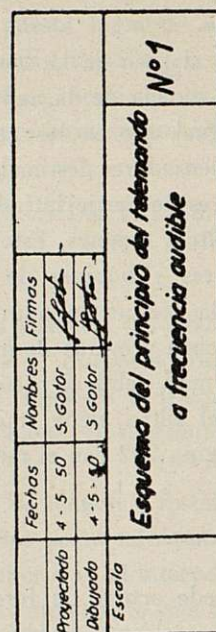
e) Este impulso será transmitido a todos los receptores y recibido por un «relais» de resonancia (17), que, cerrando su contacto, provoca la puesta en marcha del motor síncrono (19) del selector (18). Este último es, en principio, idéntico al selector de emisión, con la única diferencia que es de dimensiones más reducidas, pues lleva un número de «plots», en general, muy inferior al del aparato emisor. Desde que el brazo móvil de este selector abandona el «plot» de puesta en marcha, la alimentación del motor síncrono queda asegurada directamente por la red de 50 períodos. La puesta en marcha de todos los selectores se hace, pues, simultáneamente. Los motores síncronos de los selectores, alimentados por corriente de la misma frecuencia se encuentran, por consiguiente, en perfecto sincronismo, de manera que sus brazos móviles toman en cada instante la misma posición con relación a la inicial o de reposo.

El décimo «plot» de cada selector, por ejemplo, será alcanzado por todos los brazos móviles prácticamente en el mismo tiempo. Admitamos que precisamente el décimo «plot» del selector de emisión (7) haya sido puesto bajo tensión por uno de los pulsadores (4): el «contactor» (9) está excitado y, por tanto, se produce una segunda impulsión, llamada «impulsión de mando».

«El «relais» de resonancia de los receptores recibe este segundo impulso y lo transmite por mediación del brazo móvil del selector (18) al «relais» basculante (2), cuya bobina de conexión está conectada con el «plot» número 10. Este «relais» basculante cierra su contacto, provocando de esta forma la operación de mando deseada: excitación de un «relais» de doble o triple tarifa, conexión o desconexión de un calentador de agua, etc. El contacto del «relais» (2) queda cerrado incluso si el impulso de mando cesa, hasta que la bobina de desconexión sea excitada con ocasión de una nueva emisión.

Los brazos móviles de los selectores, tanto del poste







emisor como los de los receptores, continúan su carrera y dan la vuelta completa, efectuando esta operación aproximadamente en 30 segundos, después de lo cual la alimentación de los motores síncronos queda automáticamente interrumpida, lo que provoca su paro hasta que una nueva emisión tenga lugar.

Es evidente que en el curso de una sola revolución del brazo móvil del selector de emisión, varios impulsos pueden ser producidos sucesivamente en el selector y transmitidos a la red por el procedimiento descrito.

Es, asimismo, posible el actuar simultáneamente varios pulsadores (4). El tren de impulsos así formado comprende entonces, además del impulso de puesta en marcha, varios impulsos de mando. Si el impulso de puesta en marcha no va seguido de ninguna impulsión de mando, el brazo móvil efectúa una vuelta en vacío.

Un pulsador (5) permite, además, repetir a voluntad un programa previsto de antemano en el «contactor» (2). Esta disposición está, sobre todo, indicada para poder repetir una o varias órdenes en la transmisión que pueden quedar interrumpidas por falta de tensión, o como consecuencia de una desconexión de una rama de la red. El juego de lámparas de señalización, cuyo número corresponde al número de operaciones de mando que haya que efectuar, indica en cada instante la naturaleza de la operación efectuada en los abonados.

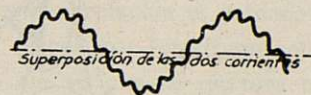
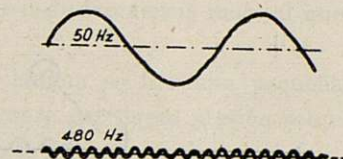
## CARACTERÍSTICAS PARTICULARES DE UN SISTEMA DE TELEMANIobra.—DEDUCCIONES Y CÁLCULOS RELATIVOS AL MISMO

### 1. Frecuencia elegida.

Vamos a examinar más detalladamente la realización de este sistema de mando a distancia cuyo principio, según se ha explicado, consiste en inyectar en las canalizaciones existentes, corrientes con frecuencia musical. Estas corrientes se superponen a la corriente industrial de 50 períodos, y son recogidas o detectadas por receptores adecuados. La instalación comporta, pues, una fuente de corriente con frecuencia musical, uno o varios órganos de unión entre esta fuente y la red principal, y cierto número de «relais» receptores cuya particularidad estriba en ser insensibles a la frecuencia de 50 Hertz y sensibles a la frecuencia musical emitida.

En el canal o cable común se superponen dos corrientes, que circulando luego a través de los transformadores penetran en la red de baja tensión y encuentran los «relais» receptores.

Superposición de corriente principal a 50 Hz y la del telemando



La frecuencia de los impulsos transmitidos es de 485 períodos; frecuencia escogida por encontrarse en una banda prácticamente exenta de armónicos.

Para que la frecuencia emitida sea prácticamente constante, aparte del sistema de regulación que luego veremos, para obtener una velocidad constante del árbol motor del generador asíncrono independiente de la variación de carga, si la frecuencia de la red es algo variable, puede preverse el acoplamiento sobre el árbol del grupo generador de un regulador taquimétrico, como regulador de la frecuencia. En nuestro caso, con objeto de no complicar los esquemas, prescindiremos de dicha máquina-piloto.

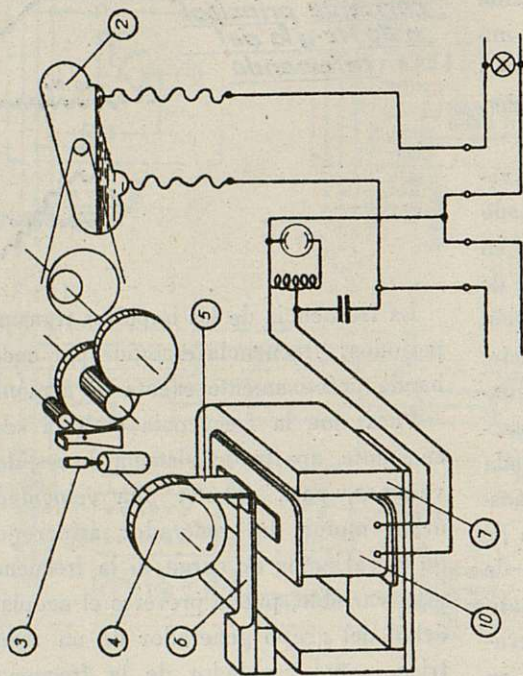
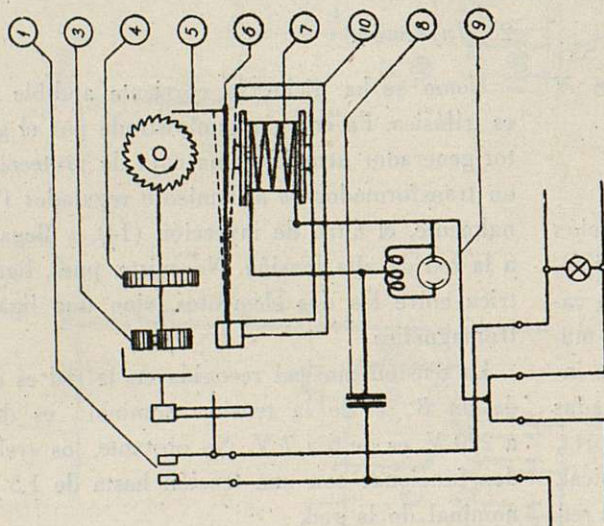
### 2. Inyección.

Como se ha dicho, la corriente audible inyectada es trifásica. La energía suministrada por el grupo motor-generator atraviesa una caja de protección, luego un transformador de aislamiento regulador (13), y, finalmente, el filtro de inyección (14), y llega, por fin, a la red de alta tensión. No existe, pues, ligazón eléctrica entre los dos elementos, sino una ligazón electromagnética.

La tensión musical recogida en la red es del orden de un 3 % de la tensión nominal; es decir, que a 220 V. es de 6 a 7 V. No obstante, los «relais» pueden funcionar con una tensión hasta de 1,5 % de la nominal de la red.

No entraremos en detalles técnicos sobre el cálculo de la potencia del grupo, ya que, claro está, dependerá de la impedancia global a frecuencia de 485 períodos de la zona de distribución, que en cada caso se ha-





Nº	Designación		
	Fechas	Nombres	Firmas
10	Imán permanente		
9	Lámpara neon		
8	Condensador de poro		
7	Bobina de excitación		
6	Lamina vibrante		
5	Cilindró		
4	Rueda dentada		
3	Dispositivo centrífugo		
2	Interrupción de corriente		
1	Interrupción		
Proyectado 7-5-50 S. Galar			
Dibujado 7-5-50 S. Galar			
Escala			
Esquema de principio del "tele-relé" receptor			Nº 2



bría de estudiar, pero prácticamente la potencia de emisión debe ser del orden de un dos por mil de la potencia a 50 períodos. En el presente estudio, suponemos que se trate de una distribución con una potencia actual de 8.000 K. V. A., pero previendo una futura ampliación hasta 10.000 K. V. A., tomamos una potencia del grupo de 22 kw.

La necesidad de instalación filtros-tapones debe ser estudiada cuidadosamente en todos los puntos de alimentación de la red. Para el cálculo y construcción de dichos filtros, interesará conocer la potencia máxima en K. V. A. que puede atravesarlos, así como la corriente de cortocircuito que pueda producirse. Si la red está alimentada por generadores o motores síncronos, interesará conocer su potencia nominal y tensiones de cortocircuito. Los condensadores estáticos deben también bloquearse cuando su potencia reactiva total sea superior a un 20 % de la potencia nominal de los transformadores de distribución que los alimentan.

### 3. Equipo receptor.

Si consideramos un punto cualquiera de la red (un enchufe de corriente, por ejemplo), comprobamos que en tiempo normal está alimentado a 200 V. y 50 períodos. En cambio, en el momento de una emisión, este enchufe es, a la vez, asiento de dicha tensión y de una tensión musical determinada; la sinusoide de baja frecuencia (50 Hz.) se encuentra de pronto modulada a una frecuencia superior. El aparato que sólo sea sensible a esta frecuencia de 485 períodos tiene, como finalidad, transformar esta energía en energía mecánica capaz de accionar un contacto. Se compone de tres órganos principales: el circuito eléctrico, la lámina vibrante selectiva y el mecanismo de engranajes que termina en el contacto principal.

El circuito eléctrico que representamos en el plano número 2, comprende un condensador cuya capacidad es del orden de 0,5 a 1 microfaradio, montado en serie con un electroimán de núcleo de hierro, y todo ello conectado a los bornes de una red a 220 V. y 50 períodos. En paralelo con el electroimán se encuentra un autotransformador que alimenta una lámpara de neón.

La lámina vibrante está constituida por acero especial de longitud y sección determinada. Esta lámina

tiene una frecuencia propia de vibración correspondiente a la frecuencia emitida. Dicha lámina está polarizada magnéticamente por el campo de un imán permanente. En el interior de éste se encuentra precisamente el electroimán que someterá a la lámina vibrante al campo alternativo de frecuencia musical que él crea.

En el extremo de la lámina se fija una pequeña lámina de acero que descansa por ligera presión sobre una ruedecita dentada. Este mecanismo tiene por finalidad transformar el movimiento alternativo de la lámina en movimiento circular. La rotación es entonces transmitida a través de un dispositivo centrífugo con ruedas dentadas. El último eje acciona la apertura o cierre del circuito principal por medio de un tubo de mercurio.

El proceso de funcionamiento es el siguiente: en tiempo normal, es decir, en ausencia de emisión, el «telerelais» absorbe una corriente de capacidad del orden de 35 a 70 mA., determinada por la capacidad del condensador. Esta corriente atraviesa evidentemente el electroimán, pero la pulsación del campo magnético que crea es demasiado lenta para actuar sobre la resonancia propia de la lámina vibrante. No obstante, las armónicas superiores de la frecuencia de 50 períodos podrían en cierta manera intervenir. No obstante, han quedado eliminadas su influencia al escoger juiciosamente la frecuencia de resonancia.

En el momento de una emisión, una corriente suplementaria con frecuencia musical, bajo una tensión de 6,5 V., aparece en los bornes del «telerelais». Para una frecuencia de 480 períodos, la inductancia del circuito interior se hace diez veces más fuerte, mientras que su capacitancia llega a ser diez veces más débil que a 50 períodos, aproximadamente. Sin llegar a la resonancia, la impedancia resultante se hace muy baja con respecto a las corrientes musicales. De ello resulta que con una tensión musical treinta y tres veces más baja que la tensión de explotación, el circuito del electroimán está recorrido por una corriente musical del orden de 30 mA.

El conjunto electroimán, autotransformador y condensador constituye así un circuito acordado flojamente en una banda, dejando pasar la frecuencia propia del aparato.

La lámina vibrante funciona exactamente como un frecuencímetro de lengüetas. Cuando la modulación



corresponda a su frecuencia propia, entrará en resonancia. Mencionemos finalmente la lámpara neón, cuyo papel es de regulador, absorbiendo los excesos de energía cuando la tensión musical es demasiado elevada y limita la corriente interna en caso de resonancia exacta del circuito acordado.

En el momento de cierre del contacto del «relais» de resonancia, funciona una de las dos bobinas (ver plano 1, núm. 20) de un «relais» basculante, que según la posición de la manivela (18) corresponderá al cierre o abertura.

#### 4. Equipo generador.

Consiste el equipo generador de impulsos en un convertidor de frecuencia, trifásico, conectado en cascada con un motor asíncrono que mueve, a su vez, a un generador asíncrono de frecuencia audible. El «compoundaje» de las velocidades de rotación se verifica tal como se verá más adelante.

##### Características del generador.

El generador es simplemente un motor asíncrono con 18 polos, y cuyo rotor se hace girar en sentido inverso del campo de excitación a una velocidad síncrona de 3.000 r. p. m.

La frecuencia engendrada en el rotor por simple rotación se calcula por la fórmula

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{9 \cdot 3.000}{60} = 450 \text{ Hz.}$$

siendo

$p$  = número de pares de polos.

$n$  = velocidad síncrona.

$f$  = frecuencia engendrada por rotación.

Pero girando en sentido contrario al campo del estator tendremos que aumentar a los 450 períodos los 50 correspondientes a la red. De donde obtenemos una frecuencia total de 500 períodos. Ahora bien, como el motor de arrastre es asíncrono, la velocidad a régimen normal será aproximadamente un 3 % inferior a la velocidad síncrona; por consiguiente, la frecuencia engendrada no es de 500 períodos, sino de 485 Hz.

Gracias a los dispositivos adoptados, y que veremos luego, el deslizamiento del motor asíncrono de arrastre será mantenido siempre a un valor constante, de

manera que la frecuencia engendrada será siempre 485 Hz. cualquiera que sea la carga del generador.

Si las variaciones de frecuencia de la red fueran importantes, y con el fin de eliminar su influencia, sería en ciertos casos conveniente el intercalar entre el transformador de reglaje (8) y el transformador serie (15) del plano núm. 3 un regulador de frecuencia, de forma que el deslizamiento del motor asíncrono podría ser igualmente regulador según la frecuencia de la red.

Resumiendo, las características del generador asíncrono trifásico, son:

Potencia, 22 kw.

Rotor conectado en estrella, con su punto neutro accesible, con cuatro anillos.

Tensión excitación del estator, 3.220/127 V.

Tensión en el rotor, 3.220 a 485 períodos.

Corriente de excitación, alrededor de 12 A.

Antes de determinar las características eléctricas y de funcionamiento del convertidor y del motor, veamos cuál es el dispositivo empleado para mantener constantemente la frecuencia de 385 Hz., haciéndola para ello independiente de la carga del generador asíncrono.

#### DISPOSICIÓN EMPLEADA PARA EL «COMPOUNDAGE» DE LAS VELOCIDADES DE ROTACIÓN DE DOS MÁQUINAS TRIFÁSICAS EN CASCADA QUE SIRVEN COMO MOTOR DE ARRASTRE DE UN GENERADOR ASÍNCRONO DE FRECUENCIA AUDIBLE

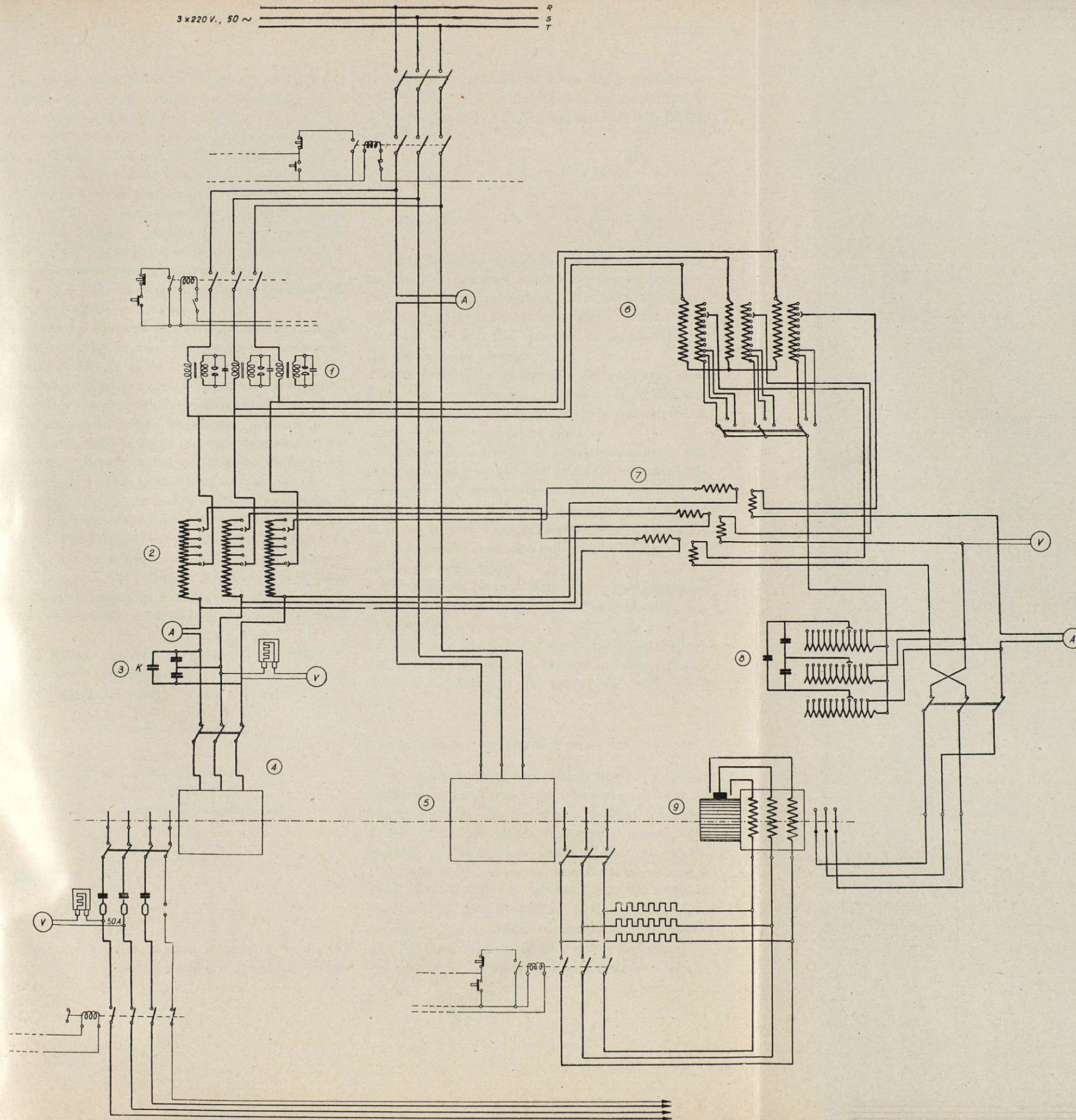
Las instalaciones de mando a distancia con corrientes de mando de frecuencia musical, exigen una gran constancia de la frecuencia de mando. La causa principal es que los órganos de paro (tapones-filtros) que impiden la salida de la energía por los puntos de alimentación de la red poseen una curva de resonancia de mucha pendiente. Otra razón consiste en la selectividad de los «relais» de recepción empleados.

Como máquina de arrastre para los generadores de frecuencia audible conviene principalmente, una combinación de un motor asíncrono trifásico y de una máquina especial que imponga al rotor del motor asíncrono una tensión de regulación adicional a la frecuencia de deslizamiento. Esta máquina especial con-



3 x 220 V., 50 ~

R  
S  
T



9	Convertidor de frecuencia		
8	Equipo para mejorar el cos $\phi$		
7	Desplazador		
6	Transformador red		
5	Motor compensado		
4	Generador asincrono		
3	Bateria de condensadores cos $\phi$		
2	Transformador serie		
1	Filtro de frecuencia		
Nº	Designación		
	Fechas	Nombres	Firmas
Proyectado	10-5-50	S Gator	<i>[Signature]</i>
Dibujado	10-5-50	S Gator	<i>[Signature]</i>
Escala	Esquema general del generador		
	Nº 3		







siste en un convertidor de frecuencia, es decir, un inducido de corriente continua con conexiones, por un lado, a un colector con tres escobillas, y por otro, a tres anillos. Este rotor gira en un estator desprovisto de arrollamiento, aunque preferentemente este transformador de frecuencia va provisto en el estator de un arrollamiento de compensación, que tiene por función eliminar el campo creado en el inducido por las corrientes del rotor. De esta forma, únicamente requiere para excitar el convertidor la potencia de excitación necesaria para producir el campo giratorio, de forma que todo el dispositivo puede funcionar sin grandes pérdidas de energía.

La tensión adicional de reglaje aplicada al rotor del motor asíncrono se hace depender de la corriente de excitación del generador de frecuencia audible arrastrado de tal manera que las variaciones de velocidad de rotación queden totalmente eliminadas. Esto puede producirse si se prevén medios que, partiendo de la componente watiada de la corriente de excitación del generador, proporcional al par mecánico de freno, engendra una tensión proporcional al par de freno, y de misma fase que la tensión de la red. Esta tensión será conducida como tensión de reglaje por intermedio del convertidor al circuito del rotor del motor, de manera que se origine en el motor un par de arrastre cuya magnitud está calculada de manera que la suma de los pares engendrados en las tres máquinas por la carga del generador asíncrono sea, lo más posible, igual a cero.

El balance de potencia del generador asíncrono, despreciando las pérdidas, puede ser representado de una manera simple tal como se indica a continuación:

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \Phi \cdot 10^{-8}$$

$$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \Phi \cdot 10^{-8}$$

En los que

$N_1$  = Número de espiras del estator  
 $N_2$  = Número de espiras del rotor

despreciando la corriente de magnetización

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

luego

$$\frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{i_2}{i_1} = \frac{f_2}{f_1} = s$$

Es decir, la potencia eficaz secundaria  $W_2$  gastada en la red y a frecuencia audible, no proviene más que

en parte de la potencia mecánica  $W_m$  del árbol. La parte restante  $W_1$  la proporciona la red (a 50 Hz.), y se tiene como valor para la potencia eficaz introducida mecánicamente:

$$W_m = W_2 - W_1; W_2 = s \cdot W_1; W_1 = \frac{W_2}{s}$$

$$W_m = W_2 - \frac{W_2}{s} = W_2 \left(1 - \frac{1}{s}\right); \frac{W_1}{W_m} = \frac{1}{s-1}$$

Si por medio de reguladores rápidos, etc., se toman medidas para mantener constante la frecuencia primaria  $f_1$ , la tensión primaria  $E_1$  y la velocidad mecánica  $n_m$ , tendremos que la componente watiada de la corriente de excitación primaria es proporcional al par mecánico del generador.

Estas propiedades establecidas del generador asíncrono son empleadas para engendrar la tensión que a título de tensión adicional de reglaje determinará al efecto requerido en el motor asíncrono.

Resumiendo, la tensión de reglaje suministrada por el transformador serie 2 (ver plano 3), y decalada de un ángulo conveniente que se calculará más tarde, y que en la práctica lo produce el «decalador» (7), va en serie con la tensión que produce el autotransformador (6) y la tensión resultante es la que se aplicará a los anillos del convertidor.

En el mismo plano número 3 se observarán baterías de condensadores (3) y (8) instaladas para mejorar el factor de potencia. Se notará que la batería (8) trabaja a una tensión mayor que la de reglaje, por ser ésta muy pequeña, gracias al autotransformador que se observa y que actúa como elevador de tensión.

### *Variación de la frecuencia de la red.*

Las consideraciones hechas hasta ahora quedan su-peditadas a disponer de una frecuencia constante en la red de 50 Hz. Las variaciones de dicha frecuencia suelen ser de igual orden de magnitud que el deslizamiento; es decir, de un tres a un cinco por ciento. Por tanto, si la frecuencia tiene fluctuaciones, debemos evitar la caída de velocidad que ellas originan por medio de algún dispositivo, y que en nuestro caso consiste en un regulador taquimétrico de frecuencia (no indicado en los planos para mayor simplificación). En este último podemos conseguir una velocidad del



árbol común muy constante, y es de observar que si la frecuencia bajase de un 3 %, por ser el deslizamiento normal un 3 %, tendríamos un deslizamiento 0, es decir, que el convertidor de frecuencia funcionaría como una conmutatriz, pero con tres escobillas en el colector.

### CÁLCULO DEL MOTOR ASÍNCRONO

Vamos a calcular el motor asíncrono con anillos, con objeto de una vez trazado su diagrama pasar a estudiar el motor asíncrono compensado.

Sus características son:

Potencia: 22 kw.

Tensión: 3 . 220, con rotor bobinado para corriente trifásica.

Velocidad síncrona: 3.000 r. p. m.

A continuación, detallamos la deducción de las características eléctricas de nuestro motor, que nos han de llevar a la determinación del diagrama de Osana.

El rendimiento prescrito por las DIN, VDE 2.651 es de 0,89.

El  $\cos \varphi = 0,9$ .

Potencia absorbida,  $22/0,89 = 24,5$  kw.

Intensidad por fase para la conexión en estrella:

$$I = I_f = \frac{24.500}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,9} = 71 \text{ A.}$$

Pares de polos:  $p = 60 . f / N = 1$ .

Pérdidas totales:  $24.500 - 22.000 = 2.500$  watios.

Para las pérdidas en el hierro se tomó 3 por 100 de la potencia absorbida, que es:  $24.500 \cdot 0,3 = 735$  watios.

Para las pérdidas adicionales tomamos un 0,5 por 100, luego:

$$P_a = 24.500 \cdot 0,005 = 125 \text{ w.}$$

Pérdidas en los cojinetes: 240 watios.

Total:

$$735 + 125 + 240 = 1.100 \text{ w.}$$

Luego las pérdidas en el cobre valen  $2.500 - 1.100 = 1.400$  watios.

Supondremos que las pérdidas en el cobre del estator y del rotor son iguales, es decir, tendremos:

$$P_{Cu_1} = P_{Cu_2} = 700 \text{ w.}$$

La resistencia de una fase del estator, es:

$$R = \frac{700}{3 \cdot 71^2} = 0,046 \text{ ohmios}$$

Número de conductores del estator en serie:

$$N'_1 = \frac{18 \cdot \pi \cdot 260}{3 \cdot 71} = 72$$

$$E_1 = 0,97 \cdot 127 = 124 \text{ V.}$$

La resistencia del rotor reducida al primario se toma igual a la primaria, luego

$$R'_2 = R_1 = 0,046 \text{ ohmios.}$$

Resistencia del rotor en cortocircuito:

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 = 0,094 \text{ ohmios.}$$

La inductancia total  $L_{cc}$  de cortocircuito vale:

$$L_{cc} = 2,65 \frac{N'^2_{r1}}{10^8} p \cdot q_1 \cdot 19 \cdot M$$

però

$$N'_{r1} = \frac{3 \cdot N'_1}{K_1}; K_1 = 6 \cdot p \cdot q_1 = 36; q_1 = 6$$

luego

$$N'_{r1} = \frac{3 \cdot 72}{36} = \frac{72}{12} = 6$$

Substituyendo, queda:

$$L_{cc} \cdot \omega = 0,264 \text{ ohmios} = X_{cc}$$

La impedancia de cortocircuito, vale:

$$Z_{cc} = \sqrt{0,094^2 + 0,265^2} = \sqrt{0,08} = 0,284 \text{ ohmios.}$$

La componente watida de la corriente en vacío, vale:

$$I_{ow} = \frac{P_{Fe} + P_a}{m \cdot U} = \frac{735 + 125}{3 \cdot 127} = 2,3 \text{ A.}$$

Para la corriente en vacío se toma un 30 por 100 de la corriente nominal, luego

$$I_o = \frac{71 \cdot 30}{100} = 21,3 \text{ A.}$$

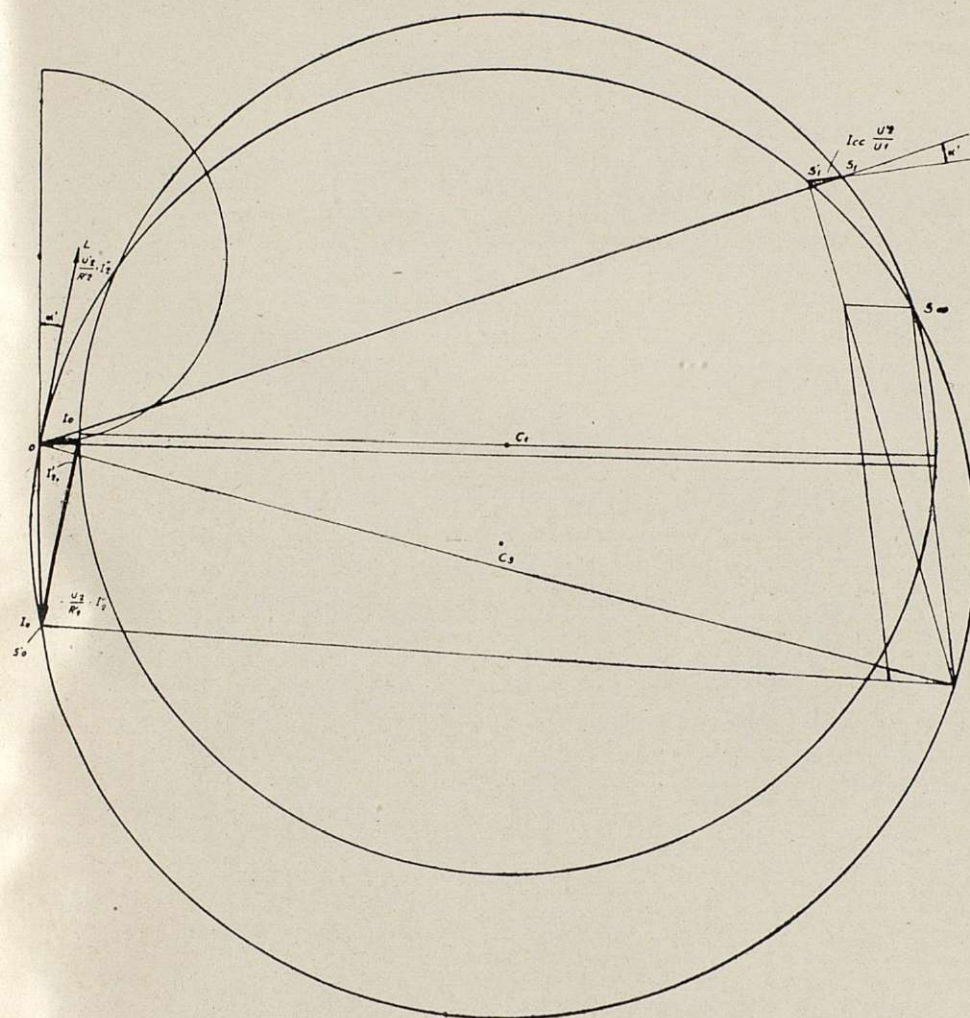
La corriente de cortocircuito vale

$$I_{cc} = \frac{127}{0,284} = 448 \text{ A.}$$

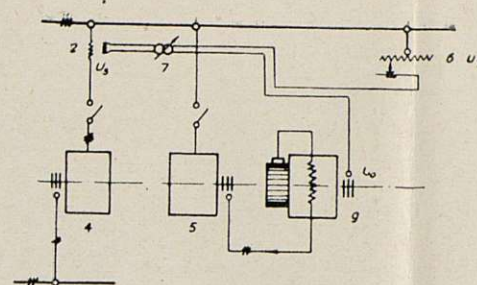
$$\text{y el } \cos \varphi_{cc} = \frac{0,094}{0,284} = 0,33$$

Se puede, pues, situar los vectores  $I_o$  y  $I_{cc}$  en el diagrama, y trazar el círculo de Osana, según indica



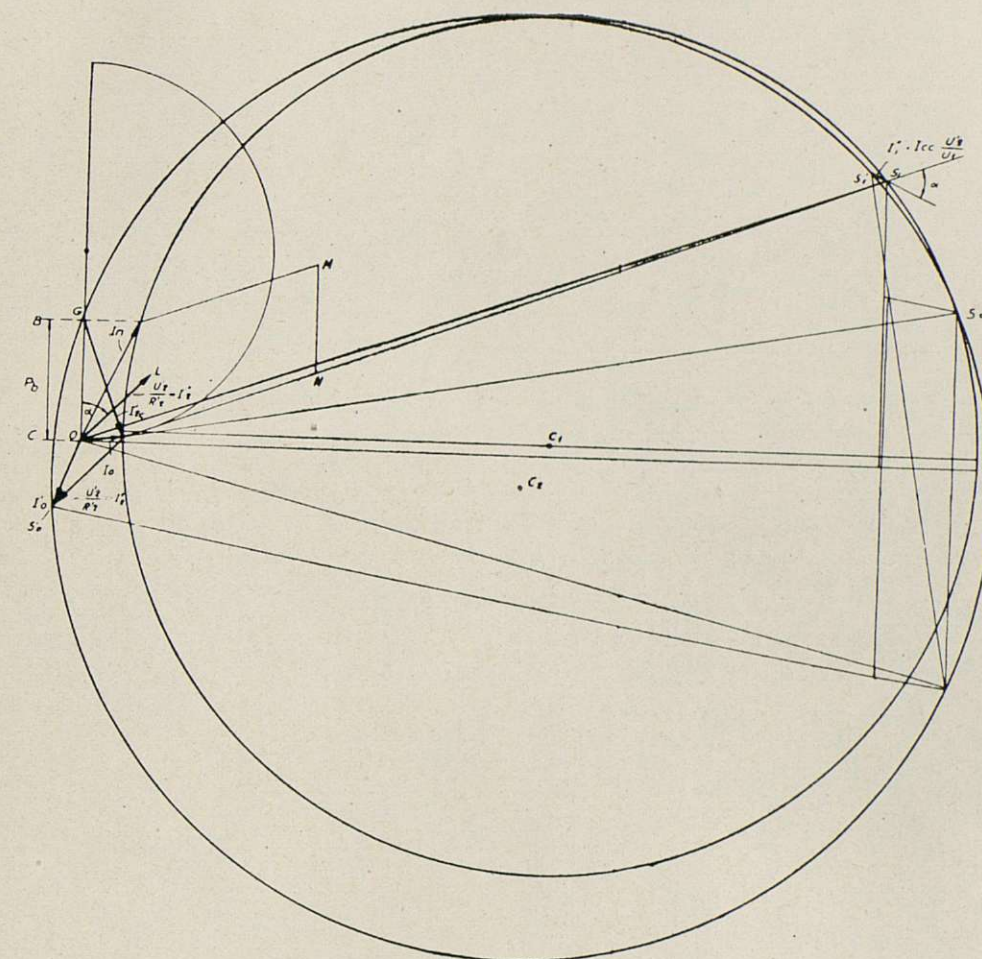
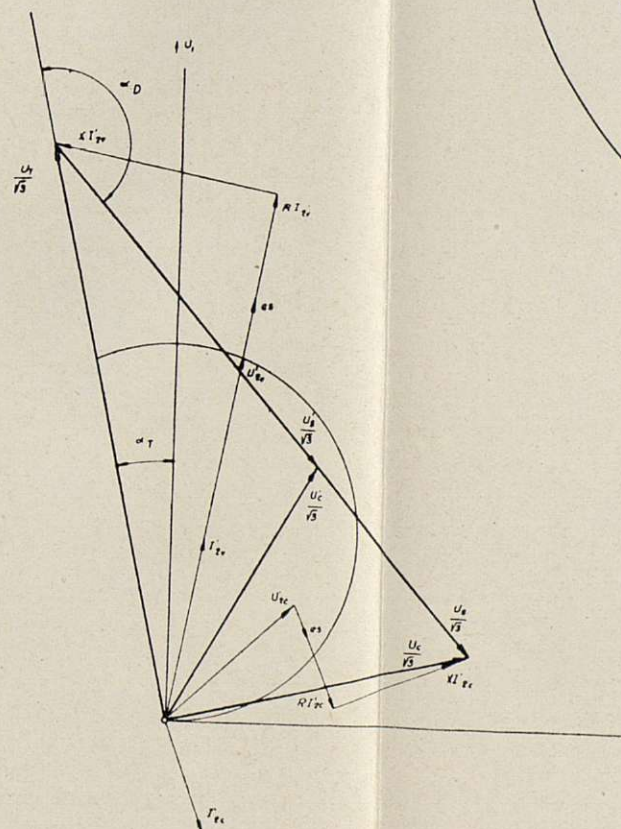


En vacío



# ESCALAS:

Corrientes : 0 20 40 60 80 100 A  
 Tensiones : 0 1 2 4 6 8 10 V  
 Potencias : 0 752 38.1 kW



En carga

5	$U_c, U_c'$	Tensiones en los anillos del convertidor a diferentes cargas
4	$U_r$	Tensión cte. que suministra el transformador (bloque) en sus anillos
3	$U_s, U_s'$	Tensiones que nos proporciona el transformador serie (el) según la carga
2	$\alpha_D$	Ángulo que nos produce el decalador (D), $\alpha_D = 150^\circ$
1	$\alpha_T$	Ángulo producido por el decalador de rotación, $\alpha_T = 23^\circ$
Designación del diagrama vectorial		
	Fechas	Nombres Firmas
Proyectado	12-5-50	S. Gotor
Dibujado	12-5-50	S. Gotor
Escala		
Diagramas del motor compensado N°4		







en el plano número 4 (este diagrama ha sido trazado con tinta negra).

La relación de transformación que se ha tomado en el motor es igual a la unidad.

# DETERMINACIÓN DEL DIAGRAMA DE OSANA DE UN MOTOR ASÍNCRONO CON ANILLOS COMPENSADO PARTIENDO DEL DIAGRAMA DEL MISMO MOTOR CON SUS ANILLOS EN CORTOCIRCUITO

## a) Motor normal.

Tengamos siempre en cuenta una relación de transformación igual a la unidad.

Las ecuaciones de este motor, serán:

$$(1) \quad U_1 = R_0 \cdot I_1 + j X_1 \cdot I_1 + j \omega M (I_1 + I_2)$$

$$(2) \quad 0 = R_2 \cdot I_2 + j S X_2 I_2 + j \omega S M (I_1 + I_2)$$

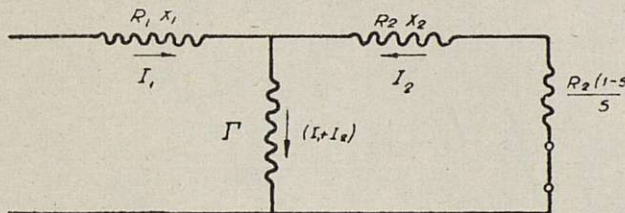
siendo:

$X_1$  y  $X_2$  Las reactancias de dispersión.  
 $M$  = coeficiente de inducción mutua.  
 $S$  = deslizamiento.

La (2) se escribe:

$$(2') \quad 0 = \frac{R_2}{S} I_2 + j X_2 I_2 + j \omega M (I_1 + I_2)$$

De (1) y (2') se obtiene el diagrama equivalente.



## b) Motor compensado.

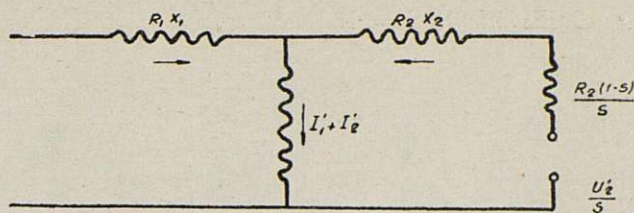
Las ecuaciones en este caso, serán:

$$(1) \quad U_1 = R_1 I_1' + j X_1 I_1' + j \omega M (I_1' + I_2')$$

$$(2) \quad U_2' = R_2 I_2' + j S X_2 I_2' + j \omega S M (I_1' + I_2')$$

$$(2') \quad \frac{U_2'}{S} = \frac{R_2}{S} I_2' + j X_2 I_2' + j \omega M (I_1' + I_2')$$

De (1) y de (2') obtenemos el siguiente diagrama equivalente:



Examinaremos separadamente los casos de deslizamiento  $S = 0$  y  $S = 1$ . Aplicando en ambos el teorema de la superposición, y considerando despreciables las impedancias de la red y la del convertidor, respecto a las restantes, se puede aplicar con suficiente exactitud el referido teorema.

## 1.º Deslizamiento $S = 0$ .

Según veremos en los esquemas de la página siguiente, hay una indeterminación, pero la corriente  $I''$ , no puede ser otra que:

$$\frac{U_2'}{R_2}$$

ya que las restantes impedancias son pequeñas con relación a

$$R_2 \frac{1-S}{S}$$

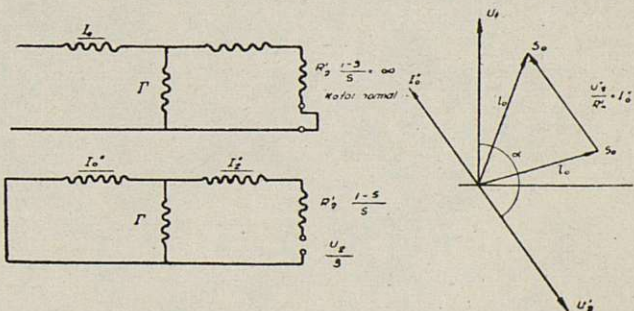
La corriente  $I''$  es algo distinta de  $I_2$  debido a la corriente que toma la rama T. Pero prácticamente podemos aplicar:

$$I'' = -I_2$$

Es decir, que en realidad la corriente que circulará será:

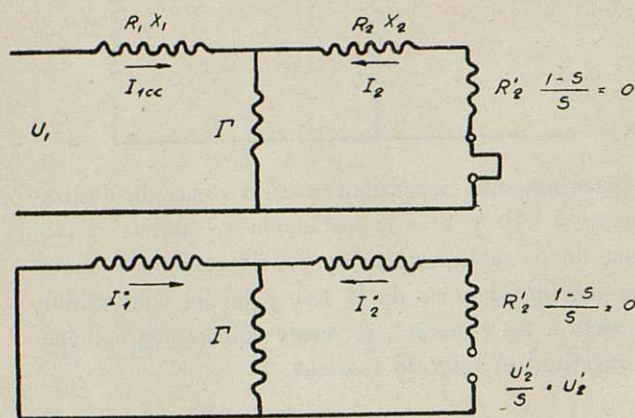
$$I_o' = I_o - I'' = I_o - I_2 = I_o - \frac{U_2'}{R_2}$$

Si damos a la tensión  $U_2'$  un determinado valor y un desfase  $\alpha$  con respecto a  $U_1'$ , tendremos situado el punto  $S_o$  en el nuevo diagrama de la figura inferior derecha.





2.º *Deslizamiento*  $S = 1$ .



T influye poco en el caso de cortocircuito, tanto alimentado por  $U_1$  como por  $U_2$ . Supondremos:  $7 = \infty$ . Resulta fácilmente que

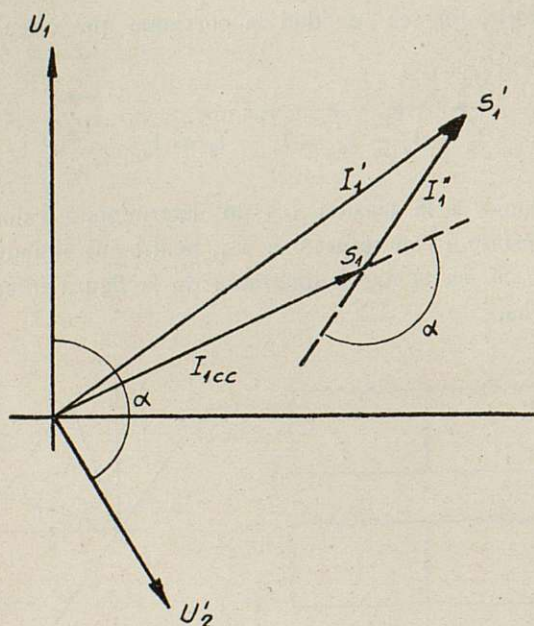
$$-\frac{I_1''}{I_{1cc}} = \frac{U_2'}{U_2}; I_1'' = -I_{1cc}$$

→  $I''_1$  y  $I_{1cc}$  forman el mismo ángulo que las tensiones  $U$  y  $U'_2$ .

La superposición nos dará la corriente real  $I'_1$ :

$$\vec{I}_1 = I_{1cc} + \vec{I}_1' = I_{1cc} + I_{1cc} \frac{U_2'}{U_1}$$

Tendremos ya situado el punto  $S'_1$  del nuevo diagrama.



3.º *Deslizamiento*  $S = \infty$ .

El punto de deslizamiento infinito, como se comprende, no habrá variado nada en el nuevo diagrama, es decir, el punto  $S' \infty$  continuará siendo el  $S \infty$ .

Para encontrar en todos los casos las corrientes secundarias, es decir, en los anillos, que son las que nos interesan, observemos que:

$$\begin{array}{ccc} \rightarrow & \rightarrow & \rightarrow \\ I_1 + I_2 & = & I_0 \end{array}$$

pero

$$\begin{aligned} I'_1 &= I_1 + I''_1 \\ I'_2 &= I_2 + I''_2 \end{aligned} \quad \text{siendo: } I''_2 = -I''_1$$

luego

$$\begin{array}{c} \rightarrow \\ \downarrow \\ I_1 + I_2 = I_0 \end{array}$$

Lo que nos dice que la suma vectorial de las corrientes primarias y secundarias de un motor asíncrono compensado es igual a la corriente en vacío del mismo motor asíncrono con anillos normal.

### SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

El problema consiste en conseguir un deslizamiento constante, independiente de la carga del generador.

Estamos ya en condiciones de poder determinar el diagrama de Osana de nuestro motor compensado, el cual vendrá determinado en cuanto fijemos en magnitud y fase la tensión  $U'_2$ , que se aplica a sus anillos.

Tal como se observa en el plano 4, partiendo del diagrama del motor normal (en negro), se hará el del motor compensado en vacío y a plena carga (en rojo). La magnitud y fase de  $U'_2$  en cada caso, han de ser tales que en ambos casos límites el deslizamiento que se obtenga sea el mismo; es decir, de un 3 %, tal como se había previsto; y además, que en el caso de plena carga pase el nuevo círculo por el punto G, para tener la potencia requerida con  $\cos \varphi = 1$ , y en el caso en vacío que el nuevo círculo pase por el punto O, origen de coordenadas.

Ambos problemas tienen solución, ya que son doblemente indeterminados, como se ha dicho. Esta doble indeterminación resulta de la arbitrariedad al coger la magnitud y la fase de  $U'_2$ .

Después de una serie de tanteos gráficos, se han en-



contrado las soluciones para ambos problemas, y en estos casos límites, que se indican en rojo en el plano núm. 4, los pares de valores de  $U'_2$  y  $\alpha$ , así como las intensidades rotóricas ( $S'_0 S_0 = I'_{2c}$  en carga, y  $GS_0 = I'_{2v}$  en vacío), se han dibujado aparte en el mismo plano, y el cuadro de valores numéricos por fase es el siguiente:

	CARGA	VACÍO
$U'_2$	2,3 V.	5 V.
$I_2$	64 A.	100 A.

Para determinar las tensiones en los anillos del convertidor, que es donde nos interesa, tendremos en cuenta las caídas internas por fase en el convertidor. Éstas serán: caídas en escobillas por fase, 0,7 V. y 0,5 V., en vacío y carga, respectivamente. Al calcular el convertidor encontraremos la caída por fase debida a las resistencias, igual a 1,4 V. en vacío, y 1 V. en carga; estas resistencias son las de sus arrollamientos. La caída de reactancia la estimamos en 3 V. en vacío y 2 V. en carga.

Efectuaremos geoméricamente estas sumas, según se indica en el diagrama vectorial del plano 4, y ob-

tendremos las tensiones siguientes, por fase en los anillos del convertidor:

$$\text{en carga } U_{cf} = 4,2 \text{ V.}$$

$$\text{en vacío } U_{Tr} = 7,7 \text{ V.}$$

así como las tensiones compuestas necesarias, cuyas amplitudes son:

$$\text{en carga } U_c = 4,2 \sqrt{3} = 7,3 \text{ V.}$$

$$\text{en vacío } U_T = 7,7 \sqrt{3} = 13,3 \text{ V.}$$

y cuyas fases se observan en el gráfico.

### CONCLUSIONES

El ángulo  $\alpha_T$  lo produciremos girando de dicho ángulo la posición relativa entre los rotores del convertidor y del motor, para lo cual se debe prever un dispositivo de regulación decalador de escobillas. La magnitud de  $U_T$  nos la debe producir el transformador de línea (6). La tensión suplementaria variable  $U_s$ , que sumada geoméricamente a la  $U_r$  nos da la tensión  $U_c$  en carga, nos las proporciona el transformador serie (2), y, finalmente, el ángulo  $\alpha_D$  nos lo debe producir el «decalador» (7).

Barcelona, 1950.

---

*Al terminarse la exposición de esta Memoria no se hizo observación alguna sobre la misma, y por no encontrarse presentes los autores de los trabajos núms. 118, 119, 120 y 236, el Presidente, Sr. Oriol, hizo una breve y substancial exposición de los mismos, y a continuación son reproducidos íntegramente en su orden.*







## N.º 118. - El rayo y sus efectos en las líneas eléctricas

Autor: D. JUAN INGLÉS COMAS

Ingeniero Industrial

La mayor parte de la energía que se consume en la actualidad es en forma de energía eléctrica; ésta, puede decirse que es la única forma que permite aprovechar las grandes cantidades de energía hidráulica que la Naturaleza pone a disposición del Hombre; pero, para ello, es preciso transportar esta energía en forma eléctrica, mediante largas líneas que, forzosamente, están expuestas a los severos efectos del rayo. Por otro lado, la importancia actual de los suministros de energía eléctrica exigen continuidad. Esta palabra ha sido, durante largos años, la constante preocupación de los ingenieros dedicados a explotaciones eléctricas, que estudian el rayo y la manera de proteger adecuadamente las instalaciones.

### FORMACIÓN DE UNA NUBE DE TORMENTA

Las nubes de tormenta son las designadas con el nombre de cúmulo-nimbus, y se caracterizan por su gran dimensión vertical y por presentar fuertes corrientes de aire ascendentes. A estas corrientes se debe la electrización de la nube. Veamos, primeramente, cómo pueden formarse estas corrientes de aire.

Al calentarse la tierra y las capas de aire inferior

por el efecto del calor solar, el calentamiento puede localizarse en determinadas masas de aire. Cualquier masa de aire que se encuentre a la misma presión, pero a una temperatura más elevada que el aire de su alrededor, tiene menos densidad y, por lo tanto, posee una fuerza ascensional. Si consideramos un volumen de aire igual a la unidad y designamos por  $\rho_2$  y  $\rho_1$  los pesos específicos del aire ascendente y el de su alrededor, respectivamente, esta fuerza ascensional vale:

$$f = \rho_1 - \rho_2$$

la que comunicará a la masa de aire una aceleración ascendente  $j$ , que valdrá:

$$j = \frac{f}{m} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\frac{\rho_2}{9'81}} = 9'81 \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2}$$

Según la ley de Gay-Lussac, los volúmenes son directamente proporcionales a las temperaturas absolutas y, por lo tanto, los pesos específicos lo serán inversamente, lo que nos da:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{o bien} \quad \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_1}$$



Y resulta, en definitiva, que la aceleración ascensional  $j$  vale:

$$j = 9,81 \frac{T_2 - T_1}{T_1}$$

Como la presión atmosférica decrece con la altura, el aire ascendente se expansionará desarrollando un trabajo, y si admitimos que esta expansión es adiabática, el trabajo desarrollado procederá del calor interno de la masa de aire ascendente, y éste se enfriará durante el ascenso. Cuando su temperatura haya descendido lo suficiente para ser igual a la del aire que le rodea, se alcanzará de nuevo el equilibrio; pero la masa de aire ascendente estará animada de una velocidad, y no podrá pararse instantáneamente, seguirá, por lo tanto, su ascensión, rebasando el equilibrio y enfriándose más que el aire de su alrededor.

Para medir este enfriamiento aplicaremos la ecuación diferencial de la expansión adiabática al aire ascendente. Así designado por  $C_p$  y  $C_v$  los valores específicos (por Kg.) del aire ascendente, por  $v$  su volumen específico (por Kg.) y por  $p$  su presión (en Kg./m.<sup>2</sup>), se tiene:

$$C_p \frac{dv}{v} + C_v \frac{dp}{p} = 0 \quad (1)$$

teniendo en cuenta la ecuación de gases perfectos

$$pv = RT \quad (2)$$

y que

$$C_p - C_v = AR \quad (3)$$

siendo  $A$  el equivalente térmico del trabajo.

La ecuación (1) puede transformarse en otra más cómoda para nuestro objeto, escribiéndola como sigue:

$$\frac{dv}{v} = - \frac{C_v}{C_p} \frac{dp}{p}$$

diferenciando ahora la ecuación (2), se obtiene:

$$dpv + vdp = RdT$$

y dividiendo por la propia ecuación (2), miembro a miembro, se tiene:

$$\frac{dT}{T} = \frac{dv}{v} + \frac{dp}{p} = \frac{dp}{p} - \frac{C_v}{C_p} \frac{dp}{p} = \frac{dp}{p} \left( 1 - \frac{C_v}{C_p} \right)$$

Y como la (3) puede escribirse

$$1 - \frac{C_v}{C_p} = \frac{AR}{C_p}$$

resulta:

$$\frac{dT}{T} = \frac{AR}{C_p} \frac{dp}{p} \quad (4)$$

ecuación que sustituye a la (1) y que debe aplicarse al aire ascendente.

La variación de la presión atmosférica con la altura vale (siendo  $\rho$  el peso específico del aire):

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dz} &= -\rho \\ \rho &= \frac{1}{v} \\ vp &= RT \end{aligned}$$

resultando de estas tres ecuaciones la siguiente:

$$\frac{dp}{dz} = - \frac{p}{RT} \quad (5)$$

La ecuación (4) debe aplicarse a la masa de aire ascendente, y la (5) al aire que la rodea. Designando por  $T_2$  la temperatura absoluta del aire ascendente y  $T_1$  la del aire que la rodea, se encuentra:

$$\begin{aligned} \frac{dT_2}{T_2} &= \frac{AR}{C_p} \frac{dp}{p} \\ \frac{dp}{dz} &= - \frac{p}{RT_1} \end{aligned}$$

y multiplicando estas dos ecuaciones miembro a miembro, se halla la relación siguiente entre las temperaturas  $T_2$  y  $T_1$

$$\frac{dT_2}{dz} = - \frac{A}{C_p} \cdot \frac{T_2}{T_1} \quad (6)$$

$$dT_2 = - \frac{A}{C_p} \cdot \frac{T_2}{T_1} dz \quad (7)$$

El calor específico del aire seco a presión constante  $C_p$  es de 0,24, y el equivalente térmico del trabajo  $A$  vale 1/427 kilográmetros por caloría. Tomando como unidad de altura  $z$  el metro, el coeficiente  $A/C_p$  vale:

$$\frac{A}{C_p} = \frac{1}{427 \cdot 0,24} = 9,8 \cdot 10^{-3}$$

La razón  $T_2/T_1$  puede tomarse igual a la unidad, ya que  $T_2$  y  $T_1$  difieren poco y son temperaturas absolutas, resultando la (7) transformada en:

$$dT_2 = - 9,8 \cdot 10^{-3} dz \quad (8)$$

Y, finalmente, si se mide la altura en Km. en lugar



de m., se encuentra que el aumento de temperatura  $\Delta t$  en grados centígrados, vale aproximadamente:

$$\Delta t \cong -10 z \quad (9)$$

Esto es, el enfriamiento del aire ascendente seco es aproximadamente de unos 10° C. por Km.

Como la temperatura de la atmósfera decrece unos 6° C. por Km., resulta que el aire ascendente se enfría unos 4° C. por Km. con respecto al aire que le rodea. Así resulta que por cada 4° C. de calentamiento, la masa de aire deberá subir un kilómetro para alcanzar el equilibrio de temperaturas.

Como el aire contiene vapor de agua, si la ascensión es suficiente, el enfriamiento puede provocar una condensación parcial del vapor de agua con el consiguiente calentamiento del aire debido a las calorías cedidas por esta condensación. Este calentamiento aumentará la aceleración ascendente del aire, provocándose una inestabilidad en la atmósfera que termina en la condensación y precipitación del vapor de agua.

## ELECTRIZACIÓN DE LA NUBE

La electrización de la nube consiste en la separación de cargas positivas y negativas, en cantidad igual, que se localizan en regiones distintas de la nube. Para explicarlo, hay diferentes teorías, que, lejos de ser similares, algunas de ellas son contradictorias; sin embargo, todas se basan en las corrientes de aire ascendentes a través de la nube. Las más importantes son la de Simpson y la de Wilson.

*Teoría de Simpson.*—Al condensarse el vapor de agua de la nube se forman gotas que caen en virtud de la acción de la gravedad; pero, en su caída, se juntan unas con otras aumentando así su tamaño, hasta que éste es suficientemente grande para que las gotas, al chocar con el aire, se pulvericen. Una vez pulverizadas, vuelven a juntarse en su caída, hasta que su tamaño vuelve a ser suficiente para pulverizarse de nuevo.

Lenard demostró experimentalmente que el tamaño de las mayores gotas que pueden caer en el aire sin pulverizarse es de unos 5 mm. de diámetro. La velocidad de caída de éstas es de unos 8 m./seg., y, como esta velocidad aumenta con el tamaño de las gotas, 8 m./seg. es la mayor velocidad que puede alcanzar

la lluvia con respecto al aire. Por lo tanto, en una corriente de aire ascendente de 8 m./seg. o más, no puede caer ninguna gota de agua.

El aire en su ascensión aumentará de velocidad hasta alcanzar la zona de equilibrio en que su fuerza ascensional ha llegado a anularse; a partir de esta zona, la velocidad decrecerá, hasta que su componente vertical se anulará.

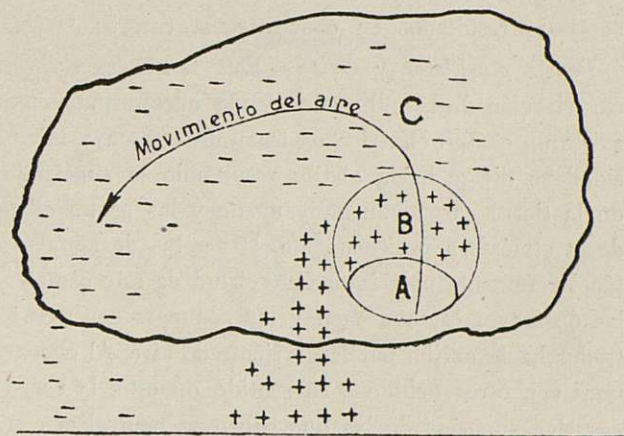


Fig. 1

El doctor Simpson admite que en la nube hay una región A (fig. 1), en la que el aire ha alcanzado una velocidad mayor de 8 m./seg., y una zona B, en la que éste tiene una velocidad alrededor de los 8 m./seg.

En la región A las gotas de agua serán pulverizadas y arrastradas a la zona B por la corriente de aire. Como experimentalmente se demuestra que, al pulverizarse las gotas de agua, éstas se electrizan con cargas positivas y el aire con cargas negativas, Simpson ha fundado su teoría en este fenómeno, explicando así cómo las gotas proyectadas a la región B (fig. 1) quedan electrizadas positivamente. En la parte alta de la nube (fig. 1, zona C), el aire ya tiene una velocidad inferior a los 8 m./seg., y no habrán gotas electrizadas; pero como el aire procede de la zona A, éste llegará electrizado negativamente.

Este aire con cargas negativas, al llegar a perder completamente su velocidad ascensional, se difunde en la parte alta y en la cola de la nube, mientras que, en la región B, hay gotas con carga positiva que caen inmediatamente detrás de la columna de aire ascendente.



En resumen, las cargas positivas quedan localizadas en una reducida región B (fig. 1), y las cargas negativas diseminadas en la parte alta y cola de la nube.

Según la teoría de Simpson, la lluvia de la tormenta consiste primeramente en grandes gotas con cargas positivas, después una lluvia mixta de gotas positivas y negativas, y, finalmente, una prolongada y moderada lluvia de gotas electrizadas negativamente. Simpson midió la carga eléctrica de las gotas, habiendo encontrado resultados en concordancia con su teoría.

*Teoría de Elster y Geitel.*—Esta teoría explica la electrización de la nube admitiendo que normalmente existe un campo eléctrico en la atmósfera, cuya intensidad se dirige hacia abajo, resultando la superficie de la tierra cargada negativamente y las partes altas de la atmósfera positivamente. Las gotas de agua están ligeramente polarizadas en virtud de este campo; las de mayor tamaño caen y las pequeñas son arrastradas hacia arriba por la corriente de aire. Al chocar unas con otras debido a su sentido opuesto, la carga negativa superior de las que suben se neutraliza con la positiva inferior de las que bajan, resultando que las ascendentes van perdiendo la carga negativa y las descendientes la positiva. Después de repetidos choques entre las gotas y pulverizaciones respectivas, se comprende cómo este mecanismo, así concebido, electrizará la nube con cargas positivas en la parte alta y negativas en la parte baja (fig. 2).

*Teoría de Wilson.*—El profesor Wilson admite también la existencia de un campo eléctrico inicial en la atmósfera, como en la teoría de Elster y Geitel, y llega a la misma configuración eléctrica de la nube; pero la explica en forma más completa, basándose, además, en la ionización del aire.

En el campo eléctrico inicial que admite Wilson, los iones positivos se dirigirán hacia abajo y los negativos hacia arriba, con una velocidad que será proporcional a la intensidad del campo eléctrico, correspondiendo 3 mm./seg. por cada 1.000 voltios/cm. Según Wilson, en la atmósfera de una nube, cuando la intensidad de campo llega a 10.000 V/cm. ya se producen descargas disruptivas y, por lo tanto, ésta es la mayor intensidad que puede existir en la misma. Así resulta, que la máxima velocidad de los iones de una nube es de 3 cm./seg. con respecto al aire.

La velocidad de caída de las gotas depende de su

tamaño, y corresponde 3 cm./seg., a las que tiene 0,1 mm. de diámetro aproximadamente. Como que éstas pueden llegar a tener hasta 5 mm. de diámetro, habrá en la nube una gran cantidad de gotas que descenderán con mayor velocidad que los iones positivos.

Si los iones positivos no pueden descender a la velocidad de la gota, no podrán alcanzarla y, por lo tanto, no podrán neutralizar su carga negativa de la parte superior, mientras que los negativos neutralizarán la carga positiva de la parte inferior. De esta forma Wilson explica cómo las gotas quedan con cargas negativas y el aire ascendente se carga positivamente, resultando la misma estructura de la nube que en la

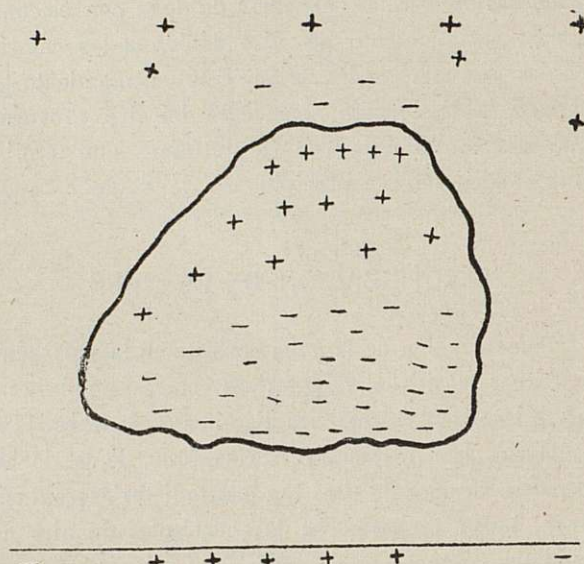


Fig. 2

teoría de Elster y Geitel (fig. 2); pero en contradicción con la de Simpson.

La intensidad del campo atmosférico en buen tiempo es del orden de 100 V/m. al nivel del mar, correspondiendo una densidad sobre la superficie de la tierra de tres unidades electrostáticas negativas por m.<sup>2</sup>. Este campo produce una conducción de cargas eléctricas por corrientes de aire de unas 2 millonésimas de amp./Km.<sup>2</sup>, que para los 500 millones de Km.<sup>2</sup> de la superficie de la Tierra equivale a unos 1.000 amperios en todo el planeta. Esta corriente es suficiente para neutralizar el campo.

Pero la teoría de Wilson explica también cómo puede compensarse esta neutralización. Por una parte, la



carga de la nube (fig. 2) electriza positivamente la parte alta de la atmósfera. Por otra parte, debajo de la nube se forma un intenso campo eléctrico opuesto al normal de buen tiempo y de valor mucho más elevado, que sin llegar a producir ninguna descarga disruptiva, origina una conducción de cargas eléctricas de signo opuesto y de valor mucho más elevado que el que hay en buen tiempo. Se ha demostrado experimentalmente que la corriente de descarga en un solo pequeño árbol bajo una nube puede exceder a la corriente de 1 Km.<sup>2</sup> de superficie en el campo eléctrico normal. A veces éstas descargas son visibles en forma de efluvios, como ocurre en los altos mástiles de los buques, y se conocen con el nombre de fuego de San Telmo.

*Comparación de las teorías.*—Evidentemente que los resultados de las teorías de Simpson y de Wilson no coinciden. Según la primera, la base de la nube tiene la región delantera con la fuerte carga positiva y trasera con una densidad negativa relativamente débil, lo que hace suponer que la mayoría de descargas a tierra deberían ser en la parte delantera y llevando cargas positivas, mientras que, según la teoría de Wilson, todas las descargas a tierra deberían ser negativas.

Desde 1932, con la introducción del amperímetro de cresta se ha facilitado enormemente la medición de las descargas a tierra y su polaridad en las torres de las líneas de transmisión de energía eléctrica.

Resumiendo el resultado de los muchos miles de estos amperímetros que se han instalado en varios países, puede decirse que el número de descargas negativas oscila de un 62 % a un 97 % del total, según las observaciones. Esto demuestra que, a pesar de las anteriores teorías, la mayoría de las descargas son negativas; pero no puede dudarse de la presencia de descargas positivas.

## FORMACIÓN DE LA DESCARGA

Durante los años 1934-35 y 36, el doctor Schonland en el Sur de África y Mc. Eachron en los Estados Unidos efectuaron estudios fotográficos de la propagación del rayo, la mayoría de ellos con la cámara Boys. Esta cámara fué inventada por sir Charles Boys y en síntesis consta de una película dispuesta en la parte interior de un tambor animado de un rápido movimiento de rotación (fig. 3), lo que desplaza rápidamente

esta película delante de dos objetivos fotográficos. Las diferentes descargas efectuadas por un mismo camino impresionan trozos que, debido al rápido movimiento de rotación, no se superponen, quedando así fotografiadas todas las descargas. Los dos juegos de objetivos tienen, por fin, obtener dos fotografías que, debido a la rotación de la película, presentan distorsión inversa una de la otra, lo que permite observar el sentido de la descarga.

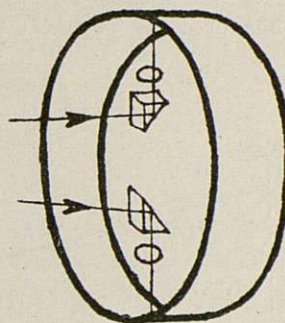


Fig. 3

Es indudable que, presentando la nube cargas de signo contrario localizadas en distintas regiones de la misma, habrá descargas en el propio interior de la nube; pero también las hay entre nube y tierra. Las primeras sólo pueden influir por inducción sobre las líneas eléctricas y demás instalaciones, mientras que las segundas influyen además por choque directo, cuya perturbación es muchísimo más severa; por tal motivo, sólo nos ocuparemos de la propagación de este segundo tipo de descargas.

La interpretación dada a las fotografías de los rayos es la siguiente:

*Iniciación de la descarga.*—Se inicia la descarga con una chispa similar a una saeta que va de la nube hacia tierra con una velocidad aproximadamente igual a un sexto de la que se propaga la luz (unos 50.000 kilómetros por segundo), pero desaparece después de recorrer una pequeña parte del camino. Después de un intervalo de tiempo del orden de 100 microsegundos, una segunda chispa parte del mismo punto de la nube y recorre también como una saeta el mismo camino que la primera, y desaparece luego también, pero llega a unos 50 metros más abajo. Después de otro lapso, parte una tercera chispa con las mismas características, y así sucesivamente van saliendo chispas de la nube hasta llegar a la tierra. Esta serie de



chispas forman la llamada descarga directriz («leader stroke»), que generalmente llega a tierra por medio de un centenar de chispas y empleando un tiempo del orden de una centésima de segundo.

La descarga directriz puede ramificarse en varios caminos, y entonces no llegan a tierra todos los ramales, sino que, cuando una chispa alcanza la tierra, por cualquiera de los caminos, cesa la descarga directriz para tener lugar la llamada descarga principal. La figura 4 representa la fotografía, por medio de la cámara Boys, de una descarga cuyo camino tiene una ramificación.

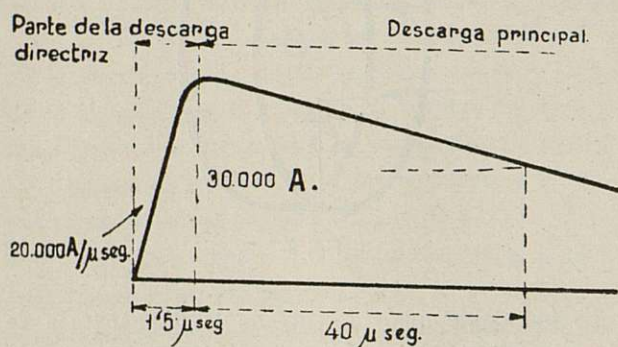


Fig. 4

En las fotografías se observa que la nueva parte del camino que atraviesa cada chispa aparece más brillante que el resto.

**Descarga principal.**—En el instante que la descarga directriz llega a tierra, se produce la llamada descarga principal, cuya iluminación es más intensa que la de la directriz, y se dirige de la tierra a la nube por el camino abierto por la descarga directriz y propagándose a una velocidad aproximadamente igual a la décima parte de la luz (unos 30.000 kilómetros por segundo). La mayor intensidad de iluminación tiene lugar en el punto de contacto con tierra y disminuye hacia la nube, a la cual, muchas veces, no llega.

Se dan casos en los que la descarga directriz disipa la energía de la nube antes de llegar las chispas a tierra, y, en tales casos, no tiene lugar la descarga principal; es decir, la serie de chispas que forman la descarga directriz llegan a agotar la carga de la nube antes de que el canal que van abriendo en la atmósfera llegue a tierra.

**Descargas múltiples.**—Las dos descargas mencionadas suelen repetirse un cierto número de veces, for-

mando así las llamadas descargas múltiples, las cuales tienen un mecanismo algo distinto del descrito; pero también se forman de la descarga directriz y de la principal. La primera, que también se dirige de la nube a tierra, lo hace, generalmente, con una sola chispa, que desciende con un solo paso y con velocidad que puede estar comprendida entre la décima parte, a menos de una centésima parte de la correspondiente a la luz. El camino que sigue esta descarga generalmente es el mismo que ha trazado la descarga inicial, pero está menos expuesta a ramificaciones y a menos cambios de dirección y puede ser desplazada varios metros debido a corrientes de aire durante el tiempo que transcurre de descarga a descarga.

El intervalo de tiempo entre descargas consecutivas es bastante variable, pero es grande comparado con el que emplea una descarga; generalmente, oscila entre 0,001 y 0,5 segundos, y el tiempo total del rayo llega a veces a un segundo, aproximadamente. En líneas generales, puede considerarse que el 90 % de rayos contienen descargas múltiples.

**Interpretación eléctrica.**—La descarga eléctrica de una nube a tierra difiere de la de un condensador en el largo camino que debe recorrer la descarga y en que la carga eléctrica está distribuida en un gran volumen de materia no conductora (el aire), la cual no tiene inmediatamente disponible en cualquier punto la carga eléctrica necesaria para que la descarga eléctrica pueda tener lugar en una sola chispa. La primera chispa de la descarga directriz propaga hacia tierra la carga eléctrica en los puntos de la nube de donde parte la chispa, y otra carga eléctrica del interior de la nube viene a suplir la ya distribuida, y entonces tiene lugar la segunda chispa, y así continúa de una forma más o menos regular hasta disipar la carga eléctrica de la nube o alcanzar la tierra.

Cuando la descarga directriz se aproxima a tierra, se inducen cargas de polaridad contraria en la región de la tierra debajo del canal abierto por las chispas; estas cargas inducidas se concentran, especialmente, en las partes elevadas que tengan suficiente contacto eléctrico con tierra. Esto explica que los efluvios se formen generalmente en estas partes elevadas y antes del contacto de la descarga directriz, sin que esto quiera decir que no puedan formarse en puntos bajos de buen contacto con tierra, como estanques u otros lugares húmedos.



En el caso de una torre de una línea de transmisión, al acercarse la descarga directriz, el desplazamiento de las cargas eléctricas representa una corriente en la torre, anterior al contacto de la descarga, y puede ocurrir la formación de efluvios. Mientras la descarga directriz se aproxima, la concentración de cargas en la torre aumenta considerablemente y la corriente que aquéllas representan sube rápidamente hacia un valor máximo, que coincide con el contacto de la descarga directriz con la torre o con sus efluvios.

La descarga directriz reparte la carga eléctrica de la nube por el canal que abre en la atmósfera, y al iniciarse la descarga principal, las cargas eléctricas concentradas en la torre y en los efluvios pasan a neutralizar las cargas depositadas en el canal trazado por la descarga directriz. Esto explica la gran luminosidad de la descarga principal y el hecho de que ésta disminuye de la tierra hacia la nube, a la que, generalmente, no llega.

Así, la corriente en la torre (fig. 5) crece rápida-

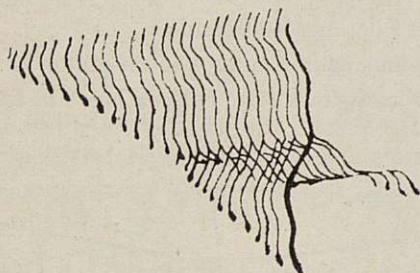


Fig. 5

mente de cero a un valor máximo, que coincide con el choque de la descarga directriz con los efluvios, formándose el frente escarpado de la onda. Entonces tiene lugar la descarga principal, que constituye la cola de la onda.

Mediante el amperímetro de cresta se ha medido la intensidad de muchos rayos. Desde la invención de este aparato, en 1932, hasta 1934, se instalaron unos 24.000 en varias líneas de Alemania, y han dado como resultado que las intensidades de cresta más corrientes están comprendidas entre 30.000 y 40.000 amperios. La variación de la corriente con el tiempo, o sea la inclinación del frente de la onda, es más difícil de determinar y depende, desde luego, de la inductancia de la torre a que se dirige la descarga directriz. Es-

tudios y experimentos han dado por resultado una variación de 20.000 a 40.000 amperios por microsegundo.

La longitud del frente de la onda, en general, está comprendida entre 1 y 6 microsegundos, considerando (fig. 5) 30.000 amperios de cresta y una inclinación de 20.000 A/ microsegundos, se encuentra de 1,5 microsegundos. En cuanto a la cola de la onda, su longitud depende de la altura a que llega la descarga principal y de su velocidad. Para los estudios y pruebas, se ha considerado la onda tipo (fig. 5) de 1,5 microsegundos de frente y 40 microsegundos de cola, hasta que el valor llegue a la mitad de la cresta.

### ONDAS ERRANTES

Las instalaciones eléctricas más expuestas al rayo son las líneas aéreas. En general, todas las sobretensiones de origen atmosférico a que pueden estar sometidos los transformadores y equipos de una central tienen entrada por estas líneas.

El efecto del rayo en las líneas u otras instalaciones puede producirse de dos maneras bien distintas: por choque directo de la descarga con la línea, o por inducción. Sólo nos ocuparemos de las primeras, por ser de mucha más importancia, ya que su efecto es mucho más severo. Tanto unas como otras se presentan en la línea en forma de ondas errantes.

Resumiendo brevemente la teoría de las ondas errantes que se propagan por un solo conductor aéreo (figu-

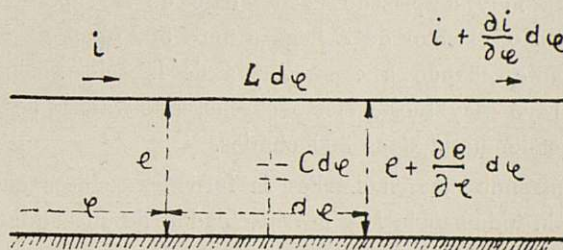


Fig. 6

ra 6), y admitiendo que este conductor sólo presenta inductancia y capacidad, se tiene:

$$\begin{aligned} e - \left( e + \frac{\partial e}{\partial x} dx \right) &= L dx \frac{\partial i}{\partial t} \\ i - \left( i + \frac{\partial i}{\partial x} dx \right) &= C dx \frac{\partial e}{\partial t} \end{aligned} \quad (10)$$



y simplificando:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial e}{\partial x} &= L \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C \frac{\partial e}{\partial t} \end{aligned} \quad (11)$$

Este sistema de ecuaciones entre derivadas parciales se resuelve con dos funciones arbitrarias, resultando:

$$\begin{aligned} e &= f_1(x - vt) + f_2(x + vt) \\ i &= \frac{f_1(x - vt) - f_2(x + vt)}{Z} \end{aligned} \quad (12)$$

en las que:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (13) \quad \text{y} \quad Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (14)$$

La función  $f_1$  representa una onda que se propaga a la velocidad  $v$  hacia adelante, y  $f_2$  otra onda a la misma velocidad pero hacia atrás, que tiene lugar por reflexión de la primera cuando llega al final de la línea o en un punto de cambio de características.

Los valores de inductancia  $L$  y capacidad  $C$  por Km. de conductor en las líneas aéreas dan por resultado una velocidad  $v$  de propagación alrededor de la velocidad de la luz y una impedancia de ondas  $Z$  de unos 400 ohmios, y, teniendo en cuenta que para las elevadas corrientes que afluyen a la tierra en caso de rayos, el plano neutro del campo electromagnético de la línea queda muy desplazado hacia abajo de la superficie del suelo, el valor de  $Z$  llega a unos 500 ohmios. No obstante, cuando a consecuencia de la sobretensión del rayo hay fuerte efecto corona, este valor puede descender hasta unos 300 ohmios.

Entrando más en detalles, la fórmulas clásicas que dan la inductancia  $L$  y la capacidad  $C$  de un conductor aéreo, son las siguientes:

$$L = (2 \log_e \frac{2h}{r} + 0.5) 10^{-4} \text{ henrios por Km.} \quad (15)$$

$$C = \frac{10^{-8}}{18 \log_e \frac{2H}{R}} \text{ faradios por Km.} \quad (16)$$

siendo:  $h$ , la altura del conductor sobre el suelo;  $H$ , la altura sobre el plano neutro del campo electromagnético;  $r$ , el radio real del conductor, y  $R$ , el radio del

manguito formado por las cargas eléctricas cuando hay efecto corona.

Estas fórmulas (15) y (16) pueden transformarse en otras más prácticas pasando de logaritmos neperianos a vulgares y expresando en la (15) el sumando 0,5 en antilogaritmo, para convertir la suma en producto:

$$L = 0.46 \log_e \frac{2.57 h}{r} \text{ milihenrios por Km.} \quad (17)$$

$$C = \frac{0.02413}{\log_e \frac{2H}{R}} \text{ microfaradios por Km.} \quad (18)$$

Con estas fórmulas (17) y (18) fácil es deducir la que nos determina la impedancia de ondas de un conductor aéreo, para lo cual basta expresar estas fórmulas en henrios y faradios por Km. y sustituirlas en la (14), encontrándose:

$$Z = 138 \sqrt{\log_e \frac{2.57 h}{r} \cdot \log_e \frac{2H}{R}} \quad (19)$$

La onda de un rayo en el canal que abre en la atmósfera se propaga con una impedancia, cuyo valor se considera de unos 400 ohmios.

Cuando una onda  $f_1$  pasa por un punto  $M$  de cambio de características (fig. 7) tiene lugar la formación

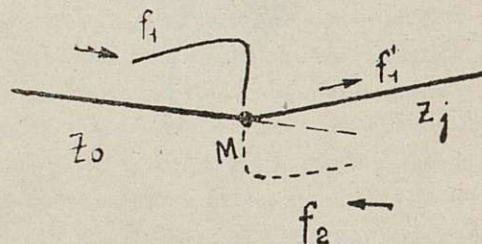


Fig. 7

de una onda reflejada  $f_2$ , y la  $f_1$  atraviesa el punto  $M$ , refractándose en la  $f_1'$ . Según la teoría de las ondas errantes, las relaciones entre las ondas incidente, reflejada y refractada, valen:

$$\text{Coeficiente reflexión} = \frac{f_2}{f_1} = \frac{Z_0 - Z_i}{Z_0 + Z_i} \quad (20)$$

$$\text{Coeficiente refracción} = \frac{f_1'}{f_1} = \frac{2 Z_i}{Z_0 + Z_i} \quad (21)$$

Para determinar la tensión y corriente que da un rayo en el punto de choque con las instalaciones, hay la teoría de Fortescue y la de Schonland, que se resumen a continuación:



*Teoría de Fortescue.*—Admite que el canal del rayo se comporta como un conductor unido al punto incidente M (fig. 8), y aplicando la teoría de las ondas

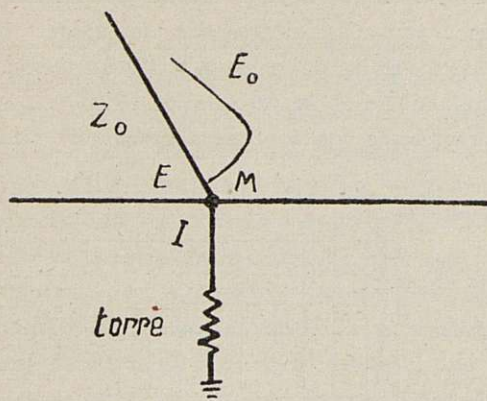


Fig. 8

(fórmulas 20 y 21), se encuentra que la tensión y corriente en el punto de incidencia M valen:

$$E = \frac{2 Z_i}{Z_o + Z_i} E_o \quad (22)$$

$$I = \frac{2}{Z_o + Z_i} E_o \quad (23)$$

siendo  $E_o$  la onda de tensión del rayo en el canal que abre en la atmósfera,  $Z_o$  la impedancia de este canal y  $Z_i$  la impedancia de la instalación en el punto de incidencia.

*Teoría de Schonland.*—Considera el canal del rayo como un conductor cargado que se conecta al punto incidente M en el momento del choque del rayo (figura 9). En tal caso, debemos considerar el canal del rayo como un cable de impedancia de ondas  $Z_o$  (fig. 9) y

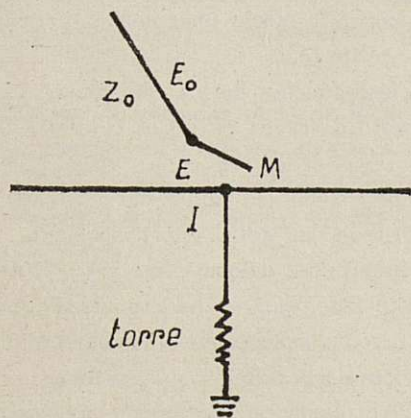


Fig. 9

cargado a la tensión  $E_o$  que se conecta al punto de incidencia M, cuya impedancia de ondas es  $Z_i$ .

En el instante de la conexión se formaría una onda reflejada  $f_2$  que ascenderá por el canal del rayo, y otra onda refractada de tensión  $E$  que recorrería la impedancia  $Z_i$ . Después de la conexión, el punto de incidencia M pertenece al canal y, por lo tanto, su tensión es la superposición de  $E_o$  con la onda reflejada  $f_2$ :

$$E = E_o + f_2 \quad (24)$$

y de acuerdo con la teoría de las ondas, fórmulas (12), la corriente vale:

$$I = \frac{-f_2}{Z_o} \quad (26)$$

Como el punto M también pertenece a la red, aplicando las fórmulas (12) tendremos:

$$I = \frac{E}{Z_i} \quad (26)$$

Eliminando  $f_2$  en el sistema formado por las ecuaciones (24), (25) y (26), se halla:

$$E = \frac{Z_i}{Z_o + Z_i} E_o \quad (27)$$

$$I = \frac{E_o}{Z_o + Z_i} \quad (28)$$

Comparando estas dos teorías, se observa fácilmente que la de Fortescue (fórmula 22 y 23) da tensión y corriente dobles que la teoría de Schonland (fórmulas 27 y 28). Sin embargo, midiendo los rayos en la forma que se indicará, las dos teorías conducen a los mismos valores de tensión y corriente y para rayos de igual medición.

## MEDICIÓN DEL RAYO

El rayo se mide por el efecto que produce; pero, tanto en la teoría de Fortescue como en la de Schonland, este efecto depende de la impedancia  $Z_i$  de la instalación en el punto incidente. Esta impedancia puede variar enormemente de un caso a otro, ya que interviene la resistencia a tierra del poste de la línea, la cual es muy variable.

El valor del rayo se acostumbra a expresarlo en amperios de cresta ( $I_g$ ), descargando directamente a tierra mediante un conductor ideal de resistencia e



impedancia nula ( $Z_i = 0$ ). Para hallar la relación que liga el valor ( $I_g$ ) de medición de un rayo con su tensión ( $E_o$ ) pueden aplicarse indistintamente las dos teorías expuestas (Fortescue y Schonland).

Aplicando la teoría de Fortescue (fórmula 23) al caso de descarga directa a tierra ( $Z_i = 0$ ), se tiene:

$$I_g = \frac{2}{Z_o} E_o \quad (29)$$

$$E_o = \frac{Z_o}{2} I_g \quad (30)$$

y aplicando la teoría de Schonland (fórmula 28) al mismo caso ( $Z_i = 0$ ), se encuentra:

$$E_o = Z_o I_g \quad (31)$$

Comparando las fórmulas (30) y (31) se observa que para rayos de igual medición ( $I_g$ ) la teoría de Schonland revela una tensión ( $E_o$ ) del rayo doble que la de Fortescue.

Para determinar la tensión y corriente en la instalación, en el punto de incidencia, basta aplicar las fórmulas (22 y 23) si se sigue la teoría de Fortescue, o las fórmulas (27 y 28), en caso de seguir la de Schonland, substituyendo en ambos casos  $E_o$  por su valor dado por la fórmula (30) o (31). De ello resulta que las dos teorías conducen a los mismos valores expresados por las fórmulas siguientes:

$$E = \frac{Z_o Z_i}{Z_o + Z_i} I_g \quad (32)$$

$$I = \frac{Z_o}{Z_o + Z_i} I_g = \frac{E}{Z_i} \quad (33)$$

Para medir la corriente de los rayos, no es posible emplear los aparatos ordinarios, debido a su inercia. En 1924 se introdujo el klydonógrafo, y en 1928 el oscilógrafo de rayos catódicos, pero siendo éste demasiado complicado y caro, no permitió efectuar el gran número de instalaciones que era necesario.

El amperímetro de cresta, inventado en el año 1932, se funda en la medición del campo magnético que produce la corriente de descarga, y en idea consiste en un haz de tiras de acero al cobalto que se instala en las torres de las líneas de transmisión, en forma que estas tiras estén orientadas en la dirección de las líneas de fuerza magnéticas; al imantarse este material con la corriente de descarga, el magnetismo remanente es suficiente para dar tiempo a que el aparato

de medida se impresione, a pesar de que la corriente ya haya desaparecido.

Durante los años 1934 y 1935, los Ingenieros Lewis y Foust, en los Estados Unidos, efectuaron muchísimas mediciones del rayo con este aparato, y llegaron hasta valores de  $I_g$  de 220.000 amperios, aunque generalmente no se pasa de los 100.000. La figura 10 representa los resultados obtenidos, mediante

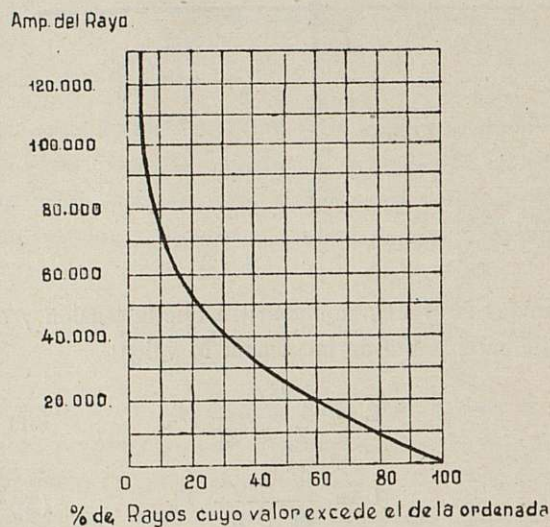


Fig. 10

una curva que indica de cada 100 rayos cuántos hay de cada valor.

## ONDAS DE MULTIVELOCIDAD

Un conductor aéreo (fig. 6), además de presentar inductancia y capacidad, también tiene resistencia y perditancia; es evidente que estas dos últimas características tienen por efecto un amortiguamiento de la onda que se propaga.

Desde la introducción de los generadores de ondas y el oscilógrafo de rayos catódicos, se han observado y estudiado rayos artificiales en las líneas de transmisión de energía eléctrica, dando por resultado que la onda, además de un gran amortiguamiento, experimenta una importante deformación, y se observa también que este fenómeno es mucho menos acentuado cuando el rayo se inserta simultáneamente en todos los conductores de la línea.

Se intentó explicar este fenómeno atribuyéndolo a la resistencia y perditancia de la línea, introduciendo



do además el efecto Skin de los conductores y efecto corona; pero sólo se consiguió complicar enormemente los cálculos matemáticos, sin que se vislumbrara ningún éxito.

Bekku demostró analíticamente que, cuando está formada una línea aérea de más de un conductor, se propagan en cada uno de ellos varias ondas, pero siempre que se intentó calcular sus velocidades se encontraron todas ellas iguales a la de la luz. En el año 1933, el ingeniero americano Bewley demostró que estas velocidades eran realmente distintas, y que se producían las llamadas ondas de multivelocidad, cuya causa no tiene nada que ver con la resistencia y perditancia de la línea, sino que se debe a la existencia de varios conductores junto con la desimetría que hay entre el campo electromagnético y el electrostático de la línea.

La figura 11 indica una línea (supuesta de dos con-

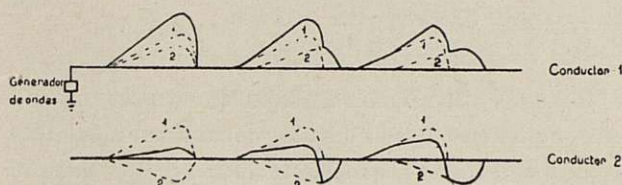


Fig. 11

ductores, para simplificar) con la superposición de las ondas de multivelocidad. Obsérvase cómo, en el conductor 1, las ondas 1 y 2 se suman, por ser del mismo signo, y, en cambio, en el conductor 2, se restan, por ser de signo contrario; lo que da un amortiguamiento y deformación de la onda del rayo en el conductor 1 y una onda inducida en el 2.

Los factores que causan la desimetría entre el campo electromagnético y el electrostático son las siguientes:

a) El campo electromagnético de la línea tiene el plano de potencial nulo desplazado hacia abajo de la superficie del suelo. Este desplazamiento puede ser importante cuando afluyan a tierra las elevadas corrientes del rayo.

b) Normalmente no hay efecto corona en las líneas, pero cuando cae un rayo en ellas, la sobreten- sión a que se elevan sus conductores produce un fuerte efecto corona. Entonces las cargas eléctricas, rompiendo la rigidez del aire, salen del conductor forman-

do un manguito, y el campo eléctrico se comporta como si el conductor tuviera el radio de este manguito.

A título de ejemplo, se indican a continuación las velocidades de las ondas calculadas por Bewley para distintas desimetrías de los campos, en una línea de dos conductores situados en un mismo plano horizontal y a 4,50 m. de distancia entre ellos:

Altura de la línea, 15 m.; diámetro de los conductores, 25 mm.

	Sin efecto corona			Con efecto corona		
<b>Campo electromagnético:</b>						
Altura de los conductores sobre el plano neutro en m.	15	30	300	15	30	300
Radio de los conductores en milímetros.....	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5

#### Campo electrostático:

Altura de los conductores sobre el plano neutro en m.	15	15	15	15	15	15
Radio aparente {	conductor 1 en mm.	12,5	12,5	12,5	37,5	37,5
	conductor 2 en mm.	12,5	12,5	12,5	25	25

#### Velocidad de las ondas con respecto a la de la luz:

Onda 1 ( $v_1$ ).....	1	0,94	0,79	0,86	0,84	0,73
Onda 2 ( $v_2$ ).....	1	0,99	0,99	0,95	0,92	0,89

El estudio clásico de las ondas errantes se hace a base de un solo conductor; la existencia y caracteres de las ondas de multivelocidad nos indican que, para profundizar más en el sentido práctico, en lugar de tener en cuenta la resistencia y perditancia, deben estudiarse para líneas de varios conductores. Sea, por ejemplo, una línea con dos conductores, las fórmulas (11) se convierten en las siguientes:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial e_1}{\partial x} &= L_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} + M \frac{\partial i_2}{\partial t} \\ -\frac{\partial e_2}{\partial x} &= M \frac{\partial i_1}{\partial t} + L_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} \\ -\frac{\partial i_1}{\partial x} &= C_1 \frac{\partial e_1}{\partial t} + C_m \frac{\partial e_2}{\partial t} \\ -\frac{\partial i_2}{\partial x} &= C_m \frac{\partial e_1}{\partial t} + C_2 \frac{\partial e_2}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$



Cuyos coeficientes valen (fig. 12):

$$L_1 = L_2 = \frac{2}{10^9} \log_e \frac{2h}{r}$$

$$M = \frac{2}{10^9} \log_e \frac{S}{D} \approx \frac{2}{10^9} \log_e \frac{2h}{D}$$

$$C_1 = \frac{1}{18 \cdot 10^{11} A} \log_e \frac{2H}{R_1}$$

$$C_2 = \frac{1}{18 \cdot 10^{11} A} \log_e \frac{2H}{R_2}$$

$$C_m = -\frac{1}{18 \cdot 10^{11} A} \log_e \frac{T}{D} \approx \frac{1}{18 \cdot 10^{11} A} \log_e \frac{2H}{D}$$

$$A = \log_e \frac{2H}{R_1} \log_e \frac{2H}{R_2} - \left( \log_e \frac{T}{D} \right)^2$$

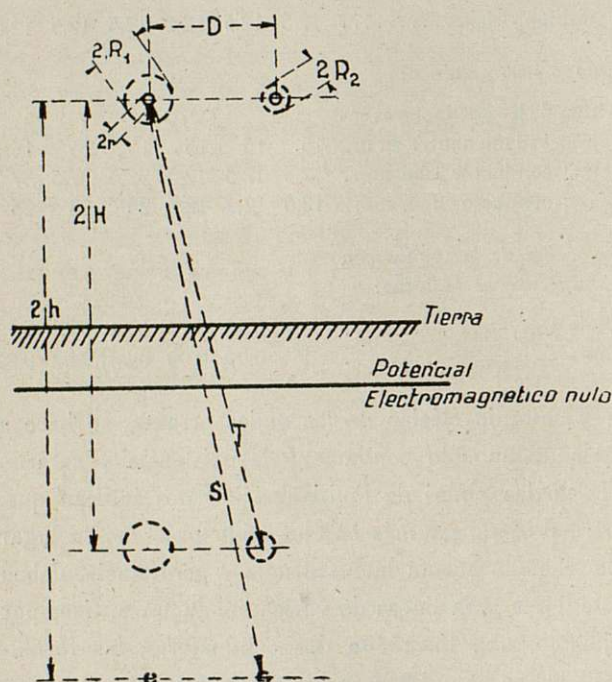


Fig. 12

La integración del sistema (34) se resuelve con cuatro funciones arbitrarias; para esto, tómanse las dos funciones siguientes:

$$\begin{aligned} e_1 &= f(x + vt) \\ e_2 &= g(x + vt) \end{aligned} \quad (35)$$

Con objeto de eliminar  $i_1$  e  $i_2$  en el sistema (34) pueden derivarse, con respecto a  $x$ , las dos primeras,

y, con respecto a  $t$ , las dos últimas, y eliminar entre éstas  $\frac{\delta^2 i_1}{\delta x \delta t}$  y  $\frac{\delta^2 i_2}{\delta x \delta t}$ , con lo que resultan dos ecuaciones entre las derivadas de segundo orden de  $e_1$  y  $e_2$ .

Substituyendo las funciones (35) en estas dos ecuaciones, se eliminan las funciones  $f$  y  $g$ , y se encuentra una ecuación de cuarto grado para determinar el valor de la velocidad  $v$ . Si no hay desimetría entre los campos, esta ecuación se resuelve en dos raíces dobles, una positiva y otra negativa, que corresponden a dos ondas que se propagan en sentido contrario: una es la incidente, y la otra, la refleja. Pero si hay disimetría, se encuentran dos raíces positivas y dos negativas, que corresponden a dos ondas incidentes y a dos reflejadas de velocidad distinta. Así, tendremos:

$$\begin{aligned} e_1 &= f_1(x - v_1 t) + f_2(x - v_2 t) + f_3(x + v_1 t) + f_4(x + v_2 t) \\ e_2 &= g_1(x - v_1 t) + g_2(x - v_2 t) + g_3(x + v_1 t) + g_4(x + v_2 t) \end{aligned} \quad (36)$$

De estas ocho funciones sólo hay cuatro arbitrarias. Se ha encontrado después de muchas transformaciones matemáticas, que las funciones  $f$  y  $g$ , de igual subíndice, representan ondas de la misma forma; es decir, que sus ordenadas son proporcionales. Dejando ahora de tener en cuenta las funciones que representan las ondas reflejadas, las fórmulas (36) quedan como sigue:

$$\begin{aligned} e_1 &= f_1(x - v_1 t) + f_2(x - v_2 t) \\ e_2 &= a_1 f_1(x - v_1 t) + a_2 f_2(x - v_2 t) \end{aligned} \quad (37)$$

siendo  $a_1$  y  $a_2$  dos constantes que dependen de las características de la línea.

Esto demuestra teóricamente el resultado de los experimentos de propagación de ondas en dos hilos paralelos, a saber: cuando una onda se propaga por un hilo aéreo, por efecto de ella, se induce otra onda en todo hilo paralelo, que se propaga exactamente a la misma velocidad y que da por resultado una disminución en la diferencia de tensión entre ambos hilos. Este efecto se conoce con el nombre de acoplamiento.

A la razón entre las tensiones de los dos conductores se la llama factor de acoplamiento (F). Esto es:

$$F = \frac{e_2}{e_1} \quad (38)$$



Generalizando el caso para  $n$  hilos paralelos, tendríamos en cada uno de ellos  $n$  ondas incidentes y otras  $n$  reflejadas, con  $n$  velocidades distintas y  $n-1$  factores de acomplamiento.

## BREVE ANÁLISIS DEL EFECTO DEL RAYO EN LAS LINEAS

*Resistencia aparente que encuentra un rayo.*—Cuando un rayo de intensidad  $I_g$  cae en un punto de una instalación, en la que la impedancia de onda es  $Z_j$ , la fórmula (32) indica la tensión de cresta que tendrá dicho punto. Esta fórmula puede transformarse en:

$$E = R' I_g \quad (39)$$

siendo

$$R' = \frac{Z_o}{Z_o + Z_j} = \frac{1}{\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{Z_j}} \quad (40)$$

Según estas fórmulas (39) y (40),  $R'$  juega el papel de una resistencia aparente, cuyo valor es igual a los ohmios de  $Z_o$  y  $Z_j$  conectados en paralelo.

El valor de  $Z_j$  depende del punto de la instalación en que cae el rayo. Tratándose de líneas aéreas, pueden distinguirse los casos siguientes:

1.º En el caso que el rayo caiga en un conductor, se propagarán dos ondas en el mismo, una en cada

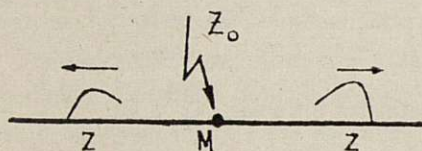


Fig. 13

sentido (fig. 13), resultando que la impedancia de ondas  $Z_j$  valdrá:

$$Z_j = \frac{Z}{2} \quad (41)$$

siendo  $Z$  la impedancia de ondas del conductor afectado.

Aplicando este valor (41) a la fórmula 40, se encuentra para la resistencia aparente  $R'$ :

$$R' = \frac{1}{\frac{1}{Z_o} + \frac{2}{Z}} \quad (42)$$

2.º Si el rayo cae en una torre, y despreciamos

la impedancia propia de la misma, el rayo sólo encuentra la resistencia  $R$  de la toma de tierra (fig 14), resultando:

$$Z_j = R \quad (43)$$

y, por tanto,

$$R' = \frac{1}{\frac{1}{Z_o} + \frac{1}{R}} \quad (44)$$

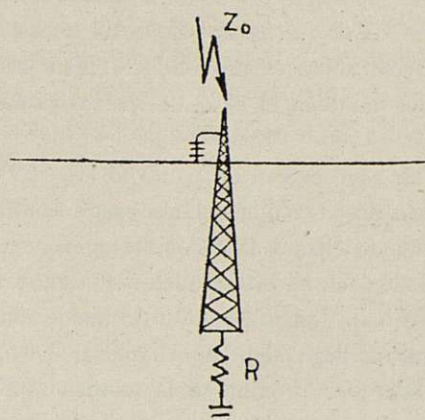


Fig. 14

3.º En caso de que el rayo caiga en el cable de tierra cerca de una torre, se propagarán dos ondas en sentido opuesto en el cable de tierra, y otra onda que bajará por la torre hacia la toma de tierra (figura 15). Si despreciamos la impedancia propia de la torre, se tiene:

$$Z_j = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{2}{Z}} \quad (45)$$

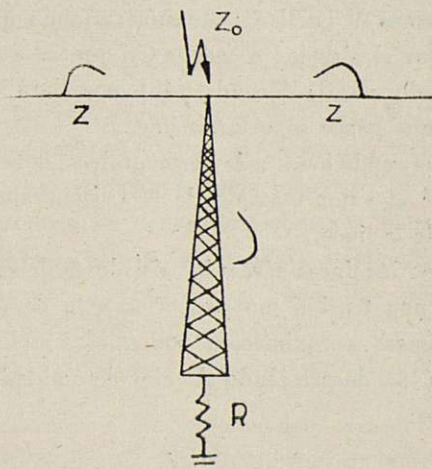


Fig. 15



y la resistencia aparente resulta ser:

$$R' = \frac{1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{R} + \frac{1}{Z_j}} \quad (46)$$

4.º Si el rayo cae en el cable de tierra, en medio de un vano, se formarán las mismas ondas que en el caso 1.º (fig. 13), y resulta para la impedancia de ondas  $Z_j$  el valor dado por la fórmula (41), y para la resistencia aparente  $R'$ , el de la fórmula (42).

**Líneas sin cable de tierra.**—En estas líneas, la mayoría de rayos caerán en un conductor; sin embargo, consideramos también el caso de que caigan en una torre.

Cuando un rayo cae en un punto M (fig. 13) de un conductor, se propaga una onda en cada sentido que, al llegar una de ellas a la torre más próxima, origina una tensión entre el conductor y esta torre. Si esta torre se halla lejos del punto de incidencia M, la onda de tensión llega algo amortiguada; pero, como el rayo puede caer próximo a la torre, simplificaremos el caso despreciando este amortiguamiento. Así, con la línea fuera de servicio, la tensión de cresta que soporta el aislador viene dada por la fórmula (39); pero, si la línea está en servicio, debe agregarse a esta tensión (39) el valor instantáneo  $e$  de la tensión de servicio que tenga la línea, resultando que la tensión  $V$  que soporta el aislador vale:

$$V = R'I_g + e \quad (47)$$

y, por tanto,

$$I_g = \frac{V - e}{R'} \quad (48)$$

Si hacemos  $V$  igual a la tensión máxima que puede soportar el aislador o cadena sin que salte el arco,  $I_g$  calculado por la fórmula (48), nos dará el rayo máximo que puede soportar la línea.

Para las condiciones más desfavorables, debe tomarse para  $e$  el valor máximo de la tensión alterna de servicio de la línea.

Como en las líneas aéreas los aisladores deben poder soportar una tensión muy superior a la de servicio, como primera aproximación podremos simplificar la fórmula (48), despreciando el valor de  $e$  al lado de  $V$ , resultando:

$$I_g = \frac{V}{R'} \quad (49)$$

Sea, por ejemplo, una línea con torres metálicas sin cable de tierra y aislada con cadenas de aisladores de 8 discos de 10 pulgadas a  $5\frac{3}{4}$  pulgadas de separación. El valor de la tensión máxima  $V$  que podrá soportar esta cadena sin que salte el arco depende del tiempo que dure la sobretensión (fig. 16). Suponiendo la onda tipo de 40 microsegundos de longitud de

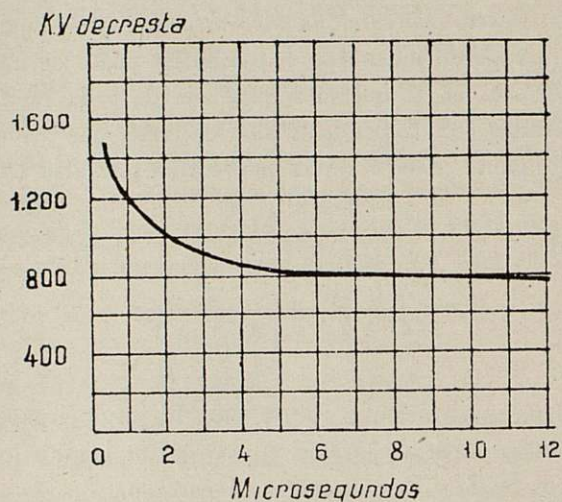


Fig. 16

Tensión de arco con 8 discos de 10 pulgadas a  $5\frac{3}{4}$  de separación.

cola hasta tensión mitad, se tiene (fig. 16):  $V = 750$  KV. y tomando

$$\begin{aligned} Z_0 &= 400 \text{ ohmios} \\ Z &= 500 \text{ ohmios} \end{aligned} \quad (50)$$

resulta, según las fórmulas (42 y 49)

$$\begin{aligned} R' &= \frac{1}{\frac{1}{400} + \frac{2}{500}} = 154 \text{ ohmios} \\ I_g &= \frac{V}{R'} = \frac{750 \cdot 1.000}{154} = \text{amperios} \end{aligned}$$

Según la figura 10, el 90 % de rayos son de intensidad superior a ésta y, por lo tanto, este 90 % produciría arco en la torre inmediata, con la consiguiente interrupción y deterioro del material. Aumentando el número de discos mejorarían muy poco las condiciones; así, con 12 discos, el valor  $V$  se habría elevado a 1.100.000 voltios, encontrándose que el 83 % de los rayos provocarían interrupción.

Si el rayo cae propiamente en la torre (fig. 14), y admitimos 80 ohmios en la toma de tierra de la mis-



ma, la resistencia aparente que encontraría el rayo (fórmula 44) sería:

$$R' = \frac{1}{\frac{1}{400} + \frac{1}{80}} = 67 \text{ ohmios}$$

resultando (según la fórmula 49):

$$I_g = \frac{750.000}{67} = 11.200 \text{ amperios}$$

La figura 10 nos da que un 75 % de rayos son de intensidad superior a ésta y, por lo tanto, un 75 % caerán en la torre y la elevarán a una tensión suficiente para que salte el arco de la torre a los conductores, provocando un corto-circuito, con la consiguiente interrupción y deterioro del material.

Disminuyendo la resistencia a tierra de la torre mejoraría notablemente este porcentaje. Así, reduciendo esta resistencia a 25 ohmios, se encontraría que la torre quedaría protegida contra los rayos hasta de 47.700 amperios, y como sólo un 23 % de rayos (fig. 10) son de intensidad superior a ésta, aquella cifra de 75 % quedaría reducida al 23 %. Pero, por este procedimiento no mejoraríamos la protección de la línea contra los rayos en los conductores y, precisamente, la mayoría son de esta clase.

Para proteger adecuadamente estas líneas, además de mejorar las tierras, deben instalarse pararrayos tipo válvula, con objeto de que, antes de saltar el arco de un conductor a la torre, funcionen los pararrayos, descargando, a través de la toma de tierra, la intensidad del rayo que caiga en un conductor.

Como protección más económica, en lugar de los pararrayos, se instalan descargadores, que, en caso de sobretensión, el arco salta entre sus extremos en lugar de hacerlo en el aislador. Pero, como no tienen el efecto de válvula, provocan un corto-circuito y la interrupción consiguiente en el servicio. Esto es: protegen el material, y pueden evitar la avería, pero no la interrupción del servicio.

Para las líneas de muy alta tensión, la instalación de pararrayos tipo válvula resultaría de elevado coste y, en general, es preferible la instalación del cable de tierra, que, como veremos, proporciona en estas líneas eficaz protección.

*Líneas con cable de tierra.*—Estas líneas tienen un

cable instalado en la punta de las torres y conectado directamente a ellas, con el objeto de que los rayos caigan, precisamente, en él; por esto debe estar a una altura suficiente para que todos los conductores de la línea se encuentren dentro de la zona de protección de dicho cable. En algunos casos, especialmente en líneas de gran anchura, se instalan dos cables de tierra, con objeto de aumentar la zona de protección.

Consideraremos que un rayo que caiga en estas líneas lo hace precisamente en el cable de tierra o en una torre, distinguiendo los dos casos siguientes: 1.º el rayo cae en una torre o en el cable de tierra, cerca de la misma. 2.º el rayo cae en el cable de tierra en medio de un vano.

Al tratar de las ondas multivelocidad, se ha visto que al propagarse una onda por un conductor paralelo, de forma que la relación de los valores  $e_1$  y  $e_2$  de la onda inicial y de la inducida es el factor de acoplamiento  $F$  (fórmula 38). Así resulta que la diferencia de tensiones entre estos dos conductores viene expresada por:

$$e_1 - e_2 = \left(1 - \frac{e_2}{e_1}\right) e_1 = (1 - F) e_1 \quad (51)$$

Según esto, al caer un rayo en un cable de tierra, se propaga una onda en cada sentido, y éstas inducen otras en los conductores de la línea. La diferencia de tensiones entre el cable de tierra y conductores viene dada por esta fórmula (51).

La tensión de cresta de la onda inicial en el cable de tierra viene dada por la fórmula (39) y la sobretensión de este cable sobre los conductores resulta ser (si la línea no está en servicio):

$$V = (1 - F) R' I_g \quad (52)$$

Al llegar estas ondas a la torre inmediata se reflejan retrocediendo hacia el punto de incidencia y anulando parcialmente la onda incidente. Si esta onda reflejada llega al punto de incidencia antes que la cresta de la incidente, ésta quedará disminuída. Designando por  $\alpha$  un factor que represente esta disminución, la fórmula (52) se convierte:

$$V = \alpha (1 - F) R' I_g \quad (53)$$

Si la línea está en servicio, debe agregarse a esta sobretensión el valor instantáneo  $e$  de la tensión de servicio que tuvieran los conductores, resultando que



la sobretensión del cable de tierra sobre los conductores vale:

$$V = \alpha (1 - F) R' I_g + e \quad (54)$$

y, por lo tanto,

$$I_g = \frac{V - e}{\alpha (1 - F) R'} \quad (55)$$

Cuando un rayo cae en una torre o en el cable de tierra cerca de la misma, el cable de tierra y la torre toman un potencial eléctrico más elevado que el de los conductores y la tensión que soportan los aisladores viene dada por la fórmula (54). Si esta tensión  $V$  la hacemos igual a la tensión máxima que puede soportar el aislador o cadena sin que salte el arco,  $I_g$  calculado por la fórmula (55) nos dará el rayo máximo que puede soportar la línea.

Para las condiciones más desfavorables, debe tomarse para el valor máximo de la tensión alterna de servicio de la línea.

Como los aisladores deben soportar una tensión muy superior a la de servicio, podremos simplificar la fórmula 55) despreciando  $e$  al lado de  $V$ , resultando:

$$I_g = \frac{V}{\alpha (1 - F) R'} \quad (56)$$

Al llegar la onda a la torre inmediata se refleja y, si consideramos vanos de 225 m., la onda tardará 1,5 microsegundos en ir a la torre siguiente, reflejarse y retroceder. Si consideramos la onda tipo, su frente es precisamente de 1,5 microsegundos, y la onda reflejada llegará a la torre de partida al mismo tiempo que la cresta de la onda incidente, resultando que el factor  $\alpha$  (fórmula (56) será igual a la unidad. Para vanos mayores tendremos  $\alpha = 1$ , y para vanos menores  $\alpha < 1$ .

Si la resistencia a tierra de la torre fuese nula, la onda reflejada sería igual o contraria a la incidente, y anularía la tensión en la torre de reflexión. Considerando (fig. 17) una resistencia de 80 ohmios y una

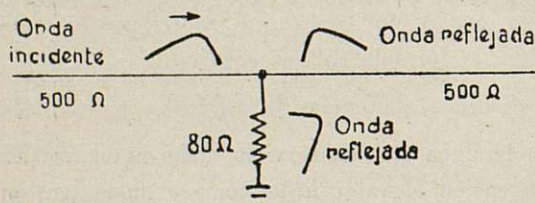


Fig. 17

impedancia de ondas de 500 ohmios, se tiene para los valores  $Z_o$  y  $Z_j$  de la fórmula (20):

$$Z_o = 500 \text{ ohmios}$$

$$Z_j = \frac{1}{\frac{1}{500} + \frac{1}{80}} = 69 \text{ ohmios}$$

y para el coeficiente de reflexión (fórmula 20), se encuentra:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{500 - 69}{500 + 69} = 0.76$$

Reduciendo la tierra a 25 ohmios, este coeficiente de reflexión llegará a 0,91. Para simplificar, lo consideraremos que se llega a la unidad anulando por completo la tensión en la torre de reflexión.

Considerando el caso de que  $\alpha = 1$  (vanos mayores de 225 m.), el tiempo medio de duración de la sobretensión  $V$  en los aisladores es el tiempo  $T_o$  que tarde la onda en llegar a la torre inmediata y regresar la reflejada a la torre inicial. Para comprenderlo, basta observar las figuras 18 y 19 que indican

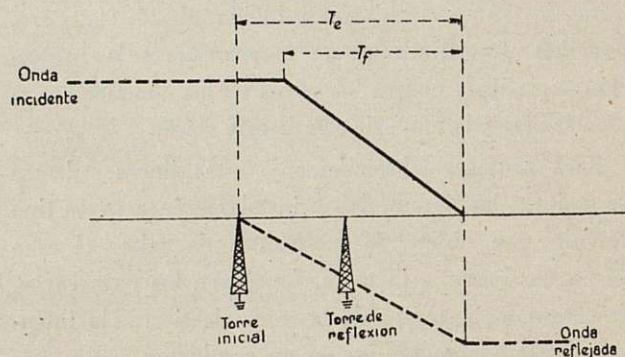


Fig. 18

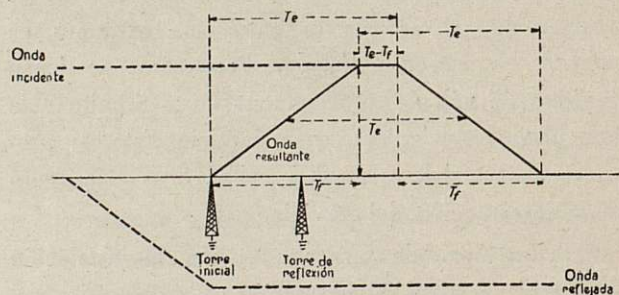


Fig. 19

las posiciones de las ondas incidente y reflejada y su composición cuando ha transcurrido un tiempo  $T_o$  y



$(T_e + T_f)$ , respectivamente (siendo  $T_f$  la duración del frente de la onda).

Volvamos al ejemplo considerado al tratar de las líneas sin cable de tierra, pero supongamos que ahora está equipada con cable de tierra. Al caer un rayo en este cable, cerca de una torre o en la misma (fig. 15), la resistencia aparente  $R'$  valdrá (según la fórmula 46):

$$R' = \frac{1}{\frac{1}{400} + \frac{1}{80} + \frac{2}{500}} = 52.5 \text{ ohmios}$$

Considerando la onda tipo y vanos de 300 metros, tendremos  $\alpha = 1$  y, si además suponemos un factor de acoplamiento  $F = 0.20$ , la fórmula (56) nos da:

$$I_g = \frac{V}{(1 - 0.20) 52.5} = \frac{V}{42} \quad (57)$$

Con los vanos de 300 metros, el tiempo  $T_e$  que tardará en llegar la onda reflejada a la torre inicial será de 2 microsegundos, el cual deberá tomarse como duración media de la sobretensión. En este caso, la tensión máxima  $V$  que podrán soportar las cadenas de aisladores sin saltar el arco, será (fig. 16) de 1.000.000 voltios y la fórmula (57) nos da para el rayo máximo que puede soportar la línea en este caso:

$$I_g = \frac{V}{42} = \frac{1.000.000}{42} = 23.800 \text{ amperios}$$

Según la figura 10, el 50 % de estos rayos podrán provocar arco entre la torre y línea, con el consiguiente corto-circuito e interrupción.

Disminuyendo la resistencia de la toma de tierra de las torres a 25 ohmios, encontraríamos, aplicando de nuevo las fórmulas (46) y (56):

$$R' = \frac{1}{\frac{1}{400} + \frac{1}{25} + \frac{2}{500}} = 21.5 \text{ ohmios} \quad (58)$$

$$I_g = \frac{V}{21.5 (1 - 0.20)} = \frac{1.000.000}{17.2} = 58.000 \text{ amperios}$$

Resultando 58.000 amperios como valor máximo del rayo que puede soportar la línea. Según la figura 10, sólo el 15 % provocarían arco, con la consiguiente interrupción en el servicio y deterioro de material.

Una de las maneras de mejorar la toma de tierra de las torres consiste en enterrar conductores desnudos conectados al pie de la torre. Un método muy eficaz consiste en la instalación de las llamadas contraantenas, que es un conductor desnudo enterrado siguiendo la línea y conectado a las torres. La eficacia de esto, no consiste solamente en la gran mejora de la toma de tierra, sino que, además, se propagan ondas por este conductor que aumentan el factor de acoplamiento de la línea.

Otro método más económico y eficaz ha venido a substituir al anterior: Consiste en mejorar la toma de tierra con algunas contra-antenas cortas u otro procedimiento, y para mejorar el acoplamiento, instalar otro cable de tierra en las torres por debajo de los conductores. Este segundo cable puede aumentar el factor de acoplamiento a 0.45. Supongámonle instalado en la línea considerada anteriormente, la fórmula (56) aplicada nuevamente nos da (recordando el valor 58):

$$I_g = \frac{V}{21.5 (1 - 0.45)} = \frac{1.000.000}{11.8} = 85.000 \text{ amperios}$$

siendo 85.000 amperios el rayo máximo que soporta la línea, tendremos (fig. 10) que los rayos que provocarían interrupción serán sólo el 7 %.

En cuanto a los rayos que caigan lejos de la torre, por la resistencia aparente  $R'$  muy elevada, provocan una sobretensión elevadísima en el punto de choque del cable de tierra; si éste no está suficientemente alto sobre los conductores saltará el arco a los mismos, provocando una interrupción. El número de rayos que provoquen esta interrupción dependerá de la altura del cable de tierra y de la longitud de los vanos, ya que esta longitud influye en el tiempo que tarde en llegar la onda reflejada y, por lo tanto, en la duración de la sobretensión. Mediante cálculos parecidos, puede determinarse en una línea dada el % de rayos en el centro del vano que provocarían la interrupción.

La instalación del cable de tierra es adecuada para las líneas de muy alta tensión, en donde con buenas tierras en las torres se llega a conseguir que la elevación de potencial de las mismas provocada por la mayoría de rayos pueda ser resistida por los aisla-



dores. En cambio, en las de tensión no tan alta, como el aislamiento es inferior, no resistirían potenciales tan elevados en la torre y, además, por ser más baratos los pararrayos tipo válvula resultan más económicos que la instalación del cable de tierra.

*Centrales y estaciones transformadoras.*—En estas instalaciones, en general, el rayo entra por las líneas aéreas en forma de ondas. Resumiendo, puede decirse que la protección de los aparatos y equipos consiste en la instalación de pararrayos tipo válvula y procurar

que la onda que viene de la línea aérea ya sea amortiguada.

Si el rayo que cae en la línea lo hace lejos de la central o estación, cuando llegue a ésta ya estará amortiguado; pero no sucederá así, si cae cerca; por esto, en las líneas aéreas, a veces, sólo se instala cable de tierra en las llegadas de las centrales y estaciones, evitando así que caigan rayos en los conductores cerca de la central o estación.

Mayo, 1950.

---

---

#### LISTA BIBLIOGRÁFICA

«LIGHTNING», por B. L. GOODLET.—THE METROPOLITAN VICKERS GAZETTE, marzo 1937.

«THE THUNDERSTORM», por EVANS y MC. EACHRON.—GENERAL ELECTRIC REVIEW, septiembre 1936.

«THE LIGHTNING STROKE», por MC. EACHRON y MORRIS.—GENERAL ELECTRIC REVIEW, octubre 1936.

«THE SURGE-CREST AMMETER», por FOUST y KUEHNI.—GENERAL ELECTRIC REVIEW, diciembre 1932.

«LIGHTNING INVESTIGATION ON TRANSMISSION LINES», por LEWIS y FOUST.—ELECTRICAL ENGINEERING, agosto y septiembre 1935.

«PROTECTION OF TRANSMISSION LINES AGAINST LIGHTNING», por BEWLEY.—GENERAL ELECTRIC REVIEW, abril 1937.

«ATTENUATION AND DISTORTION WAVES», por BEWLEY.—ELECTRICAL ENGINEERING, diciembre 1933.

«FLASHOVER ON TRANSMISSION LINES», por BEWLEY.—ELECTRICAL ENGINEERING, abril 1936.



N.º 119. - Interconexión de varias centrales distantes en una red de alimentación en bucle cerrado. Estudio y regularización de las cargas en la misma, así como de las potencias activa y reactiva de las centrales correspondientes. Apertura y cierre del bucle en el servicio

Autor: D. JUAN INGLÉS COMAS  
Ingeniero Industrial

1. ASPECTO GENERAL

10.—ALCANCE DEL TEMA

Se supone que el lector conoce las fórmulas clásicas de corrientes alternas, operaciones con cantidades complejas, representación de vectores por complejas, funciones hiperbólicas y representación por cuádrupolos.

No creemos adecuado exponer las cuestiones relacionadas con el tema y corrientemente tratadas en los libros de texto. Asimismo, entendemos que en el alcance del tema no está comprendida materia alguna sobre protección de las líneas del bucle y de las centrales, estudios sobre estabilidad de las líneas y de la marcha en paralelo de las centrales, sistemas de comunicación, sistemas de telemedida y telemando por

ondas en líneas de alta tensión o líneas telefónicas y fenómenos transitorios.

11.—CONSIDERACIONES SOBRE LÍNEAS DE INTERCONEXIÓN

Entendemos por línea de interconexión aquella que une dos centrales pertenecientes a empresas distintas con objeto de poder intercambiar bloques de energía, de acuerdo con programas predeterminados. Desde el punto de vista eléctrico, esta línea es como cualquier otra de transmisión, y, evidentemente, su estudio es el mismo que si conectara centrales de una misma empresa. La diferencia radica, esencialmente, en la necesidad de regular la potencia que se ha de transportar, lo suficiente para intercambiar las cantidades de energía previstas.



Sabido es que las líneas eléctricas tienen sus características repartidas en su longitud. A saber: resistencia, reactancia, capacidad y perditancia. En la práctica, se simplifican los cálculos todo lo posible prescindiendo de la perditancia, ya que ésta sólo tiene importancia cuando existe efecto corona, y este efecto no debe presentarse en las condiciones normales de funcionamiento.

En líneas cortas y de mediana tensión, además de considerar las características localizadas, puede, en muchos casos, prescindirse de la capacidad. Cuando la tensión es elevada, a pesar de ser la línea corta, generalmente hay que tener en cuenta dicha capacidad; pero pueden considerarse sus tres características localizadas, dando lugar a los conocidos circuitos equivalentes en T ó en  $\pi$ .

En las líneas largas (Apéndice I), si precisa exactitud, es necesario tener en cuenta las características uniformemente repartidas en su longitud, lo que se logra con las conocidas ecuaciones de Blondel, a base de funciones hiperbólicas de variable compleja, lo que han dado lugar a muchos gráficos y ábacos.

Por ser estas funciones precisamente de variable compleja, su determinación conduce a complejas con coeficientes hiperbólicos y trigonométricos (formulas 159), cuyo cálculo exige, por lo tanto, el empleo de las dos tablas. En los gráficos 1 y 2 (Apéndice I) se extractan de la «General Electric Review», de mayo de 1926, unas curvas que dan directamente los coeficientes de estas complejas.

Estas funciones hiperbólicas pueden desarrollarse en serie, y resultan ser de convergencia tan excelente que generalmente permite emplear sólo sus dos primeros términos, con un error insignificante (fórmulas 163). Para tener idea del mismo, pueden observarse las curvas de la figura 37, que representa los módulos de los términos de las series (véase Apéndice I).

Si, además, despreciamos el segundo término del seno hiperbólico, éste resulta igual al argumento, y las fórmulas quedan reducidas a las (164), las que equivalen a suponer las características localizadas, determinando la tensión por el circuito equivalente en  $\pi$  y la corriente por el equivalente en T. El error cometido por esta simplificación resulta aún admisible para muchos casos prácticos; para tener idea del mismo, detallamos a continuación los resultados del cálculo de

una línea trifásica de 110 Km. de longitud, 152 mm<sup>2</sup> de sección de cobre, con 110 KV. a la llegada y una carga de 20.000 KVA con  $\cos \varphi = 0,8$  inducción.

	Cálculo con funciones hiperbólicas	Cálculo con el circuito equivalente	
		$\pi$	T
Tensión en el extremo inicial	$\left\{ \frac{115.630}{\sqrt{3}} / 2^{\circ}24' \right.$	$\frac{115.800}{\sqrt{3}} / 2^{\circ}59'$	—
Corriente en el extremo final	$\left\{ 93'2A., \varphi = 28^{\circ}47' \right.$	—	$93'2A., \varphi = 28^{\circ}37'$

Las líneas de interconexión, por tener que unir centrales de distintas empresas, acostumbran a ser más largas líneas de transmisión. En general, su resistencia es pequeña al lado de la reactancia, y su estudio se simplifica despreciando esta resistencia, con lo que queda una línea sin pérdidas.

Es conveniente proyectarlas para transmitir su carga característica; pues, si son de gran longitud (varios centenares de Kms.), sus pérdidas y caída de voltaje aumentan mucho al apartarse su carga de este valor. La carga característica es de  $\cos \varphi = 1$  y proporcional al cuadrado de la tensión (fórmula 150), para líneas 110 KV, resulta ser de unos 32.000 KW.

Para el estudio de la estabilidad de las líneas, es conveniente expresar la potencia que transmiten (Apéndice I) en función de sus tensiones extremas y del ángulo  $\delta$  que forman (fig. 1 y 2):

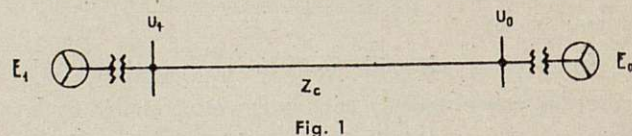
$$P = \frac{U_1 U_0}{Z_0 \sin \psi} \sin \delta \quad (1)$$

siendo

$$\psi = \pi \frac{l}{6.000} \quad (2)$$

y  $l$  la longitud de la línea en Km. (1).

Para que el funcionamiento sea estable, es preciso que, cuando haya un aumento del desplazamiento



angular  $\Theta$  (fig. 1 y 2) entre los rotors y las máquinas, la potencia transmitida también aumente, frenando así el avance del rotor en el extremo genera-

(1) Véase al final de este trabajo la tabla de los símbolos en él empleados con su significado.



dor y volviendo al equilibrio. Esto exige que la curva  $P = f(\Theta)$  sea ascendente y, como esta curva es una senoide, es preciso que  $\Theta$  valga  $90^\circ$  como máximo.

Como  $\delta < \Theta$  para que haya estabilidad es necesario que  $\delta < 90^\circ$ , suponiendo un 40 % de reactancia de máquinas y transformadores en cada central

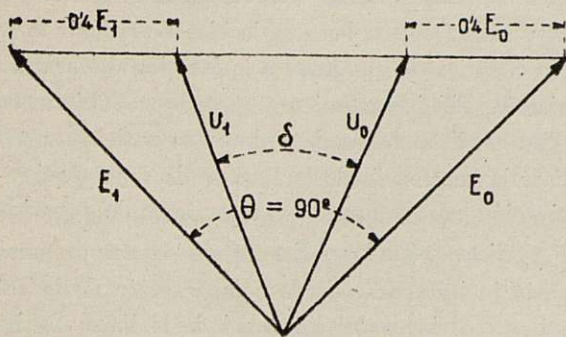


Fig. 2

y tensiones  $U_1$  y  $U_0$  iguales, resultan unos  $45^\circ$  para el valor máximo de  $\delta$  (fig. 2).

En una línea con carga característica, la tensión es igual en toda su longitud (pérdidas despreciables), y experimenta un giro determinado por la fórmula (2). Sus tensiones extremas alcanzarán el desplazamiento angular de los  $45^\circ$  cuando su longitud llegue a unos 750 Km. Esta longitud es la máxima que se considera y puede tener una línea con carga característica para asegurar su estabilidad estática.

Al presentarse una perturbación, las máquinas experimentan un choque que provoca brusca variación del desplazamiento angular  $\Theta$  entre los rotores. Si aquél era de  $90^\circ$  y muy próximo a él, tendremos una pérdida de sincronismo. Para evitarlo, debemos trabajar con desplazamientos  $\Theta$  inferiores a los  $90^\circ$  y, por lo tanto, con longitudes inferiores a los 750 Km. Difícil es fijar este margen de seguridad, pues depende de la clase de corto-circuito que provoca la perturbación y de su situación en la red, y está relacionado con la cuestión económica y exigencias de un buen servicio.

Empleando reguladores rápidos de tensión, puede mejorarse notablemente la estabilidad, y puede llegarse a longitudes de línea por encima de los 750 kilómetros; este es el caso de la llamada estabilidad artificial. En el caso teórico de considerar completamente constantes las tensiones  $U_1$  y  $U_0$ , podría llegar-

se a los 1.500 Km. de longitud, que corresponden a los  $90^\circ$  entre las tensiones extremas de la línea.

La estabilidad de una línea y el límite de potencia que puede transmitir deben estudiarse junto con las centrales que interconecta, o bien, estimar un valor máximo de  $\delta$  en la fórmula (1).

Obsérvese que el denominador de la fórmula (1) aumenta con la longitud de la línea, hasta líneas de 1.500 Km.; para longitudes mayores, este denominador disminuye, aumentando, por lo tanto, el límite de potencia de la línea. Al llegar a los 3.000 Km., este límite es, teóricamente, infinito.

Para longitudes comprendidas entre 1.500 y 3.000 kilómetros,  $\sin \Phi$  es negativo; por lo que, si cambiamos el signo de  $\sin \delta$  estaremos en las mismas condiciones de antes. Esto indica que, en tales longitudes, el funcionamiento será estable para  $\delta$  entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ , y precisamente inestable entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .

En la «Revue Brown Boveri» de octubre de 1941 se estudia el caso teórico de una línea con su central (fórmula 208 del Apéndice I). La fig. 3 indica el esquema estudiado, y las figuras 4 y 5 los diagramas obtenidos.

El diagrama de la figura 4 corresponde a una línea de 750 Km. de longitud y el de la fig. 5 a otra línea de 2.250 Km. Las partes rayadas corresponden a las zonas precisamente inestables.

Para longitudes de hasta unos 1.500 Km., una carga de  $\cos \varphi = 1$  en el extremo receptor cae en la zona estable; en cambio, para los 1.500 Km. hasta 3.000 cae en la inestable. Como la carga característica es pre-

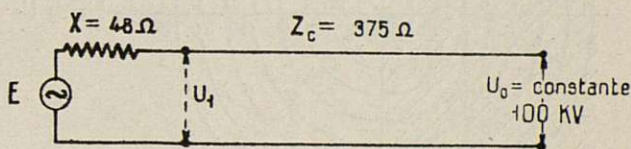


Fig. 3

cisamente de  $\cos \varphi = 1$ , este régimen no será, por lo tanto, posible para longitudes entre 1.500 y 3.000 Km.

Aunque a estas distancias posiblemente resultaría más económica la transmisión por corriente continua, también puede hacerse factible por corriente trifásica, compensado la línea mediante reactancias y capacidades. Los procedimientos que se han ideado para esta



compensación pueden resumirse a base de los siguientes:

1.º *Sistema Baum*.—Consiste en instalar condensadores síncronos intermedios, en tal forma que la línea

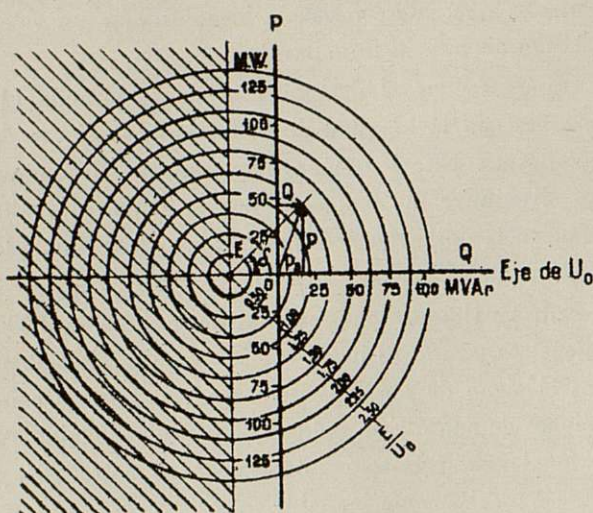


Fig. 4

quede dividida en secciones de mucha menor longitud, cuyo límite de potencia será superior.

2.º Compensando la reactancia de la línea mediante condensadores estáticos instalados en serie con la

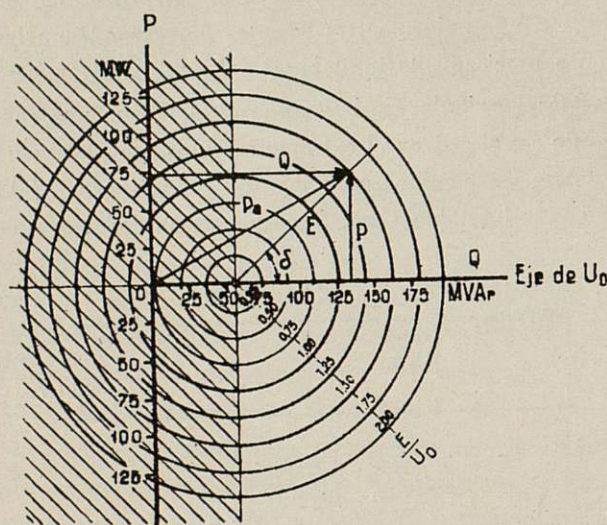


Fig. 5

línea en un número de puntos intermedios suficiente («General Electric Review», de 1928; pág. 432).

3.º *Sistema Morgan*.—Consiste en un grupo motor-generator síncronico, cuyo motor está accionado

con la tensión de la línea por medio de un transformador y cuyo generador inyecta a la línea una f. e. m. en cuadratura sensiblemente proporcional a la carga de la línea, lo que se consigue excitando el generador con la corriente de carga mediante transformadores de corriente y rectificador de mercurio polifásico.

4.º *Sistema Skilling*.—(«Transaction A. I. E. E.» 1932; pág. 51.)—Se basa en la idea de reducir la longitud eléctrica de una línea a la fracción de onda conveniente. El procedimiento propuesto últimamente (1936) consiste de condensadores en serie para compensar la reactancia de la línea y de inductancias en derivación para compensar la corriente de capacidad.

5.º *Sistema Taylor*.—Este es el sistema que presenta más interés como doble compensación de la reactancia y corriente de capacidad de la línea. Se basa en la idea de inyectar en la línea f. e. m. transversales, lo que se consigue por transformadores intermedios triángulo/estrella o estrella-zig-zag, cuyo primario esté conectado en derivación y el secundario en serie con la línea, correspondiéndose las fases de ambos circuitos en forma que las tensiones del secundario resulten en cuadratura con las del primario. Estas tensiones transversales compensan la reactancia de la línea, y la corriente de carga de ésta, al circular por los secundarios, carga los transformadores en tal forma que circula por los primarios una corriente inductiva que compensa la de capacidad de la línea.

Las líneas de interconexión pueden representarse y estudiarse como cuadripolos (Apéndice I) y, por lo tanto, toda red de interconexión puede tratarse como una red de cuadripolos.

## 12. ESTUDIO GENERAL DE UNA RED DE CUADRIPOLOS

Toda red está formada por un conjunto de líneas unidas unas con otras, formando mallas y cadenas abiertas, con objeto de distribuir la energía eléctrica en varios puntos diseminados o, en otros casos, reunir la energía generada por varias centrales para alimentar varias estaciones receptoras. En el primer caso, se tienen las conocidas redes de distribución, y en el segundo, las denominadas redes de alimentación.

Las redes de distribución, en general, pueden estudiarse substituyendo cada segmento o línea por una impedancia equivalente, ya que éstas son de corta lon-



gitud y su baja o mediana tensión permite despreciar el efecto de la capacidad. En cambio, en las redes de alimentación sus segmentos o líneas pueden ser de gran longitud y elevada tensión que obligue a ser substituídos por cuadripolos.

En toda red, se entiende por nudo el punto de reunión de varias líneas. Para facilitar nuestra exposición también se comprenderá como nudo todo punto de alimentación o consumo, aunque a éste sólo acuda una línea. Entenderemos por línea o segmento toda unión entre dos nudos, que en nuestro caso será un cuadripolo.

¿Podremos obtener en una red dada un número suficiente de ecuaciones para determinar la tensión de todos los nudos y corrientes en todos sus segmentos? ¿Cuántos datos de libre elección habremos de fijar para ello? Antes de analizar este aspecto, evidentemente eléctrico, debemos enunciar otro geométrico sobre la relación entre nudos, segmentos y mallas.

Designando por  $s$  el número de segmentos,  $n$  el de nudos, y  $m$  el de mallas independientes, se verifica siempre

$$m = s - n + 1 \quad (3)$$

Sin pretender abordar este problema geométrico con toda generalidad, se expone a continuación una demostración de esta fórmula.

Evidentemente que en toda red, por complicada que sea, si cortamos todos los nudos que concurren más de dos segmentos y abrimos las mallas que así queden, la red se habrá transformado geoméricamente en una serie de segmentos aislados y cadenas como la que se indica en la fig. 6. Haciendo de nuevo los nudos deshechos reconstruiríamos la red.

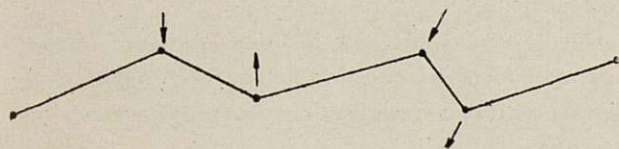


Fig. 6

Designando por  $N_1$  el número de segmentos de cada cadena así formada, al tomar la primera cadena habremos formado  $N_1$  segmentos y  $N_1 + 1$  nudos. Para agregarle la segunda, la anudaremos por sus dos ex-

tremos o sólo por uno, según que queramos formar malla o no. Así reuniremos:

	Sin formar malla	Formando malla
Segmentos.....	$N_1 + N_2$	$N_1 + N_2$
Nudos.....	$1 + N_1 + N_2$	$N_1 + N_2$
Mallas.....	0	1

Fácilmente se comprende que, al agregarle una cadena  $i$ , añadiremos a la red ya formada  $N_i$  segmentos y  $N_i$  nudos, en caso de no formar malla, o  $N_i - 1$  nudos, si la formamos. Una vez agregadas todo el número  $c$  de cadenas habremos reunido (designando por  $m$  el número de mallas formadas):

$$\text{Segmentos } s = \sum_{i=1}^c N_i$$

$$\text{Nudos } n = 1 + \sum_{i=1}^c N_i - m$$

De una simple eliminación entre estas dos, se deduce la fórmula (3).

121. *Grados de libertad*.—Para analizar ahora las relaciones entre las variables de una red, supondremos que de los  $n$  nudos hay  $d$  que coinciden con una central o estación receptora y, por lo tanto, puede entrar o salir en cada uno de ellos una corriente.

Designaremos por  $\dot{U}_i$  la tensión de un nudo  $i$ , por  $\dot{I}_{ci}$  la corriente que suministra una central  $i$  (la absorbida por una estación receptora  $i$  será  $-\dot{I}_{ci}$ ) y por  $\dot{I}_{ai}$  e  $\dot{I}_{bi}$  las corrientes en los dos extremos del cuadripolo correspondiente a un segmento  $i$ .

Así las variables serán las siguientes:

$$\dot{U}_i \quad i = 1, 2, \dots, n \dots n \text{ vectores}$$

$$\dot{I}_{ai} \quad i = 1, 2, \dots, s \dots s \text{ vectores}$$

$$\dot{I}_{bi} \quad i = 1, 2, \dots, s \dots s \text{ vectores}$$

$$\dot{I}_{ci} \quad i = 1, 2, \dots, d \dots d \text{ vectores}$$

$$\text{N.º total de vectores } N_v = n + 2s + d \quad (4)$$

En cada nudo  $i$  puede aplicarse la primera ley de Kirchhoff entre todas las corrientes que concurren en él:

$$\dot{I}_{ci} = \sum_{p=1}^p \dot{I}_{ap} - \sum_{p=1}^p \dot{I}_{bp} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

la que nos da  $n$  ecuaciones.



Cada cuadripolo tendrá sus dos extremos en dos nudos y sus cuatro variables  $\dot{U}_i, \dot{U}_{i+1}, \dot{I}_{ai}, \dot{I}_{bi}$ , están ligadas por las dos ecuaciones (151) del cuadripolo, resultando de ello 2s ecuaciones más.

Así, el número total de ecuaciones será:

$$N_e = n + 2s \quad (6)$$

El número total de vectores de libre elección será, pues:

$$N_L = N_v - N_e = d \quad (7)$$

Para discutir un poco esta fórmula, supongamos un caso teórico de una red con una sola central y ninguna estación receptora ( $d = 1$ ). Sólo presentará un vector de libre elección, que puede ser la tensión de un punto cualquiera, por ejemplo, la de la central. Entonces, esta central alimentará la red en vacío y la corriente que tomase dependería de la tensión y de las características de la red.

Supongamos ahora que queramos fijar los vectores-tensión en los  $d$  nudos; aparecerían en la red corrientes de circulación entre estos nudos, capaces de absorber sus diferencias de tensión y de ellas resultarían las corrientes de entrada o salida en cada uno de estos nudos.

En la práctica se fija el vector-tensión de un punto de la red, y quedan entonces  $d - 1$  vectores de libre elección, o sea  $2d - 2$  cantidades escalares o grados de libertad. Estas cantidades escalares pueden ser precisamente las potencias activas y reactivas que entran o salen por los  $d$  nudos menos uno.

Las potencias activas y reactivas absorbidas por las estaciones receptoras vienen fijadas por la demanda (\*), y quedan de libre elección las potencias activas y reactivas de todas las centrales menos una.

Designando por  $C$  el número de centrales, podremos escoger a entera libertad  $C - 1$  potencias activas y  $C - 1$  potencias reactivas, o bien, escoger una potencia más de cada clase con tal que se cumpla una relación entre las activas y otra entre las reactivas; pudiendo escribir, simbólicamente:

$$F_p (P_1, P_2, \dots, P_c) = 0 \quad (8)$$

$$F_q (Q_1, Q_2, \dots, Q_c) = 0 \quad (9)$$

(\*) Si hay estaciones receptoras con condensadores síncronos, podemos considerar como dato la potencia reactiva que suministra cada uno de ellos, o bien considerar el condensador síncrono como una central conectada al mismo nudo que la estación receptora, cuya potencia debe ser nula.

Estas funciones  $F_p$  y  $F_q$  pueden expresarse

$$P = \sum_1^c P_i = P_r + p \quad (10)$$

$$Q = \sum_1^c Q_i = Q_r - q \quad (11)$$

siendo  $P_r$  y  $Q_r$  la suma de potencias activas y reactivas de todas las estaciones receptoras;  $p$ , las pérdidas activas en la red, y  $q$  la potencia reactiva generada por la red por efecto de su capacidad electroestática.

La repartición de la potencia activa  $P$  entre las centrales viene determinada por el programa de producciones que hay que efectuar en cada central con miras al buen rendimiento global de cada una de ellas y al agua o combustible disponible. Su realización se consigue regulando la admisión de las turbinas, en forma íntimamente ligada con la regulación de la frecuencia de la red (véase Capítulo 2).

La repartición de la potencia reactiva  $Q$  obedece, en general, a la idea de obtener factores de potencias del mismo orden en cada central, con objeto de conseguir el mejor aprovechamiento de las potencias instaladas y mínimas pérdidas. Su realización se efectúa regulando la excitación de los alternadores, con estricta relación con la regulación de las tensiones de la red (véase Capítulo 3).

La diferencia esencial entre una y otra repartición estriba en que la primera es independiente de las características eléctricas de la red y la segunda está íntimamente relacionada con ellas. Es decir, si en un momento determinado modificamos las conexiones de la red sin variar la admisión de las turbinas, con tal de que no desconectemos ninguna central en carga, sólo sufrirá variación la repartición de la potencia reactiva. Desde luego, en el supuesto de que no varíen las pérdidas activas de la red a causa de la modificación de conexiones.

Queda demostrado, por lo tanto, que para resolver una red podemos y debemos fijar *a priori* todas las potencias activas y reactivas de todas las centrales menos una.

122. *Regulación de las cargas en la red.* — En la práctica tiene interés poder regular las corrientes que circulan por los segmentos de una red, de acuerdo con su capacidad de transmisión. Analicemos, pues, la posibilidad de esta regulación mediante la reparti-



ción de las potencias activas y reactivas en las centrales.

Supongamos una red con  $S$  estaciones receptoras y  $C$  centrales, el número  $d$  de nudos con corrientes derivadas será

$$d = S + C \quad (12)$$

y el problema será el siguiente: dado el vector corriente en uno de los extremos de cada cuadripolo o segmento, determinar el vector corriente en las  $C$  centrales, o, lo que es equivalente, sus potencias activas y reactivas suministradas a la red.

Se ha demostrado que en una red sólo puede haber  $d$  vectores libres. Pero, como en la práctica hay que fijar la tensión de un punto de la red, y son datos del problema las corrientes vectoriales en las  $S$  estaciones receptoras, el número de vectores libres en la práctica será:

$$N_L = d - 1 - S = C - 1 \quad (13)$$

Si queremos fijar una corriente por segmento y su número  $s$  es mayor de  $N_L$  habrá algunos de ellos  $s_f$  cuya corriente vendrá forzada por la de los demás. Estos segmentos serán (teniendo en cuenta las fórmulas 3 y 13):

$$s_f = s - N_L = m + n - C \quad (14)$$

Si designamos por  $n_0$  el número de nudos desprovistos de central generadora, se tiene

$$n_0 = n - C \quad (15)$$

resultando en definitiva (combinando 14 y 15):

$$s_f = m + n_0 \quad (16)$$

lo que demuestra de manera general para todas las redes, que:

En una red donde haya mallas o nudos sin central generadora, no es posible regular la corriente de todos sus segmentos por medio de la repartición de las potencias activas y reactivas en las centrales. El número de segmentos sin poder regular sus cargas será igual al de mallas más el de nudos desprovisto de central.

En vista de esto, sólo será posible regular con las centrales las corrientes de todos los segmentos, en el caso de una red abierta (sin ninguna malla) y con central en todos sus nudos, incluyendo los extremos de líneas.

En el caso de una red en bucle cerrado (una sola malla), quedará por lo menos un segmento sin poder regular su corriente. Si hay nudos desprovistos de

central, el número de segmentos forzados (sin regulación) será el de nudos sin central más uno.

Veamos ahora si es posible encontrar la manera de regular la carga de los segmentos forzados de la red. Para ello, basta observar la causa de su presencia.

La fórmula (16) indica que su número  $s_f$  está formado de dos partes  $n_0$  y  $m$ ; la primera proviene de los nudos que no tienen central reguladora, y la segunda de las mallas independientes. Analicemos, pues, cada una de estas partes.

En todo nudo  $i$  se verifica la primera ley de Kirchhoff (ecuación 5), en la que  $\dot{I}_{ci}$  es la corriente suministradora al nudo. Si en ésta hay una central reguladora, todos los valores de  $\dot{I}_{ap}$  e  $\dot{I}_{bp}$  se pueden fijar a voluntad, resultando de la (5) el valor de  $\dot{I}_{ci}$  que debe suministrar la central. Pero si hay una estación receptora,  $-\dot{I}_{ci}$  es la corriente que consume la misma, que es un dato del problema, y por tener que cumplirse la (5) la corriente de uno cualquiera de los segmentos que concurren al nudo dependerá del conjunto de los demás. Si no hay ninguna derivación en el nudo,  $\dot{I}_{ci} = 0$  y también resultará un segmento no regulable.

Toda malla  $i$  cumple con la segunda ley de Kirchhoff, y puede escribirse que la suma de las caídas vectoriales de tensión de todos sus segmentos es nula.

$$\sum_{p=1}^{p=t} (\dot{U}_{ap} - \dot{U}_{bp}) = 0 \quad (17)$$

De los  $t$  sumandos ( $\dot{U}_{ap} - \dot{U}_{bp}$ ) uno cualquiera de ellos resulta, por tanto, forzado, por depender del conjunto de los demás. Para lograr que este sumando pueda ser también un dato, precisa que el segundo miembro de la (17) pueda ser un vector regulable.

En la práctica, puede conseguirse inyectando en la malla una fuerza electromotriz  $\dot{E}_i$  con sus dos grados en libertad, o, lo que lo mismo, dos f. e. m. de módulo regulable; una, en fase, y otra, en cuadratura, y entonces se obtiene:

$$\sum_{p=1}^{p=t} (\dot{U}_{ap} - \dot{U}_{bp}) = \dot{E}_i = E_d + jE_q \quad (18)$$

La f. e. m. en fase regula la potencia reactiva en los segmentos de la malla, con poca influencia sobre la activa, y la f. e. m. en cuadratura regula la potencia activa con poca influencia sobre la reactiva (véase Apartado 32).

De este modo se consigue reducir el número de seg-



mentos no regulables al de nudos sin central, quedando en este caso la (16) reducida a

$$n_0 = nr \quad (19)$$

Si se trata de redes muy extensas (centenares de Kms.), en la práctica interesa inyectar más f. e. m. con objeto de compensar las caídas de tensiones entre las centrales o redes interconectadas. Así, en una misma malla o bucle pueden inyectarse varias f. e. m., según las líneas en las que se desee compensar su caída de tensión. Desde luego, que esto no aumentará el número de segmentos regulables; en realidad equivale a repartir la f. e. m. a inyectar  $E_i$  (fórmula 18) en varias líneas con objeto de mejorar la regulación (Apartado 32).

*Observación:* Puede resultar que, para regular la carga de ciertos segmentos de la red, a valores predeterminados, sean precisas potencias negativas en algunas centrales; como en la práctica esto no es posible, quedará aumentado, en tal caso, el número de segmentos o líneas sin regulación por medio de las centrales.

## 2.—REGULACIÓN DE LAS POTENCIAS ACTIVAS EN LAS CENTRALES

### 20.—CONSIDERACIONES GENERALES

Sabido es que, si tenemos varios alternadores acoplados en paralelo alimentando una red de distribución y queremos modificar la repartición de la carga o potencia activa entre ellos, nada conseguiremos interviniendo en las excitaciones; deberemos influir precisamente sobre las admisiones de la turbina con objeto de variar el par motor que reciben las máquinas. La variación de las excitaciones sólo puede hacer variar la repartición de la potencia reactiva.

En un sistema de varias centrales acopladas en paralelo por una red (fig. 7), se trate o no de interconexiones de empresas diferentes, la repartición de la potencia activa entre las distintas centrales es independiente de cómo sea la red de acoplamiento o interconexión y de la regulación de la tensión, y depende únicamente de las admisiones en los distribuidores o válvulas de las turbinas. Desde luego que, las potencias activas también provocan caídas de tensión, pero éstas no influyen en la repartición de aquéllas. Es decir, es una cuestión de equilibrio mecánico entre pares

motores y resistentes de las máquinas. Intervienen en los cambios de régimen y en las perturbaciones la inercia de las masas giratorias y los reguladores automáticos de velocidad.

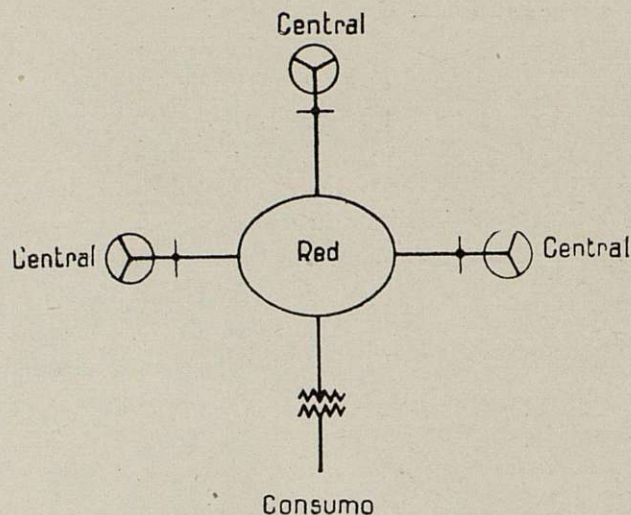


Fig. 7

En el caso de una máquina única que alimenta a una red de distribución, la carga de la máquina viene determinada por la demanda. Todo incremento (positivo o negativo) de esta demanda se traduce en un desequilibrio entre el par motor y el resistente de la máquina que provocará una aceleración (negativa o positiva en la misma; pero al variar la velocidad accionan los reguladores automáticos, los cuales accionan los distribuidores o válvulas de las turbinas, hasta volver a la velocidad de régimen con la nueva carga.

En el caso de varias máquinas o centrales en paralelo, la carga de conjunto viene fijada también por la demanda, y su repartición entre las centrales vendrá determinada por las admisiones de las turbinas. Al presentarse un incremento (positivo o negativo) en la demanda, entran en función los reguladores automáticos de velocidad, los cuales modifican las admisiones de las turbinas hasta alcanzar el nuevo régimen; pero la repartición del incremento de la demanda depende de las características de los reguladores automáticos de velocidad y puede ser muy distinta de la que convenga a las necesidades de la explotación; además, debido a la característica estática de los reguladores, la frecuencia quedará algo modificada. Para corregir la repartición de la carga y, si es preciso, también la frecuencia, hay que compensar la acción de los dis-



tintos reguladores de velocidad en forma manual o mediante dispositivos automáticos de compensación.

Los reguladores automáticos de velocidad reciben la denominación de «reguladores primarios», para distinguirlos de los indicados dispositivos automáticos de compensación llamados «reguladores secundarios».

Por la relación que existe entre ambos reguladores, séanos permitido empezar recordando los primarios.

## 21.—REGULADORES PRIMARIOS

En general, todo grupo turbina-alternador, tanto si funciona aisladamente como si está en paralelo con otros, debe estar equipado con un regulador primario, el cual consiste en un aparato que aprovechando la fuerza centrífuga de una masa o masas giratorias se desvía de su posición de equilibrio cuando la velocidad del grupo se aparta de la normal. Este desvío actúa sobre la válvula que acciona el servomotor, el cual modifica adecuadamente la admisión de la turbina (figura 8).

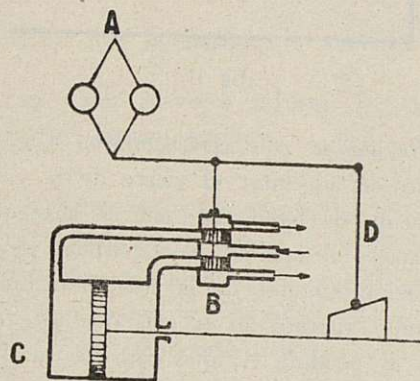


Fig. 8

En principio, los mecanismos principales de un regulador pueden agruparse como sigue:

1.º El aparato de medida o péndulo A (fig. 8), cuya posición depende de la velocidad de la máquina.

2.º La válvula de accionamiento B (fig. 8), que sigue las variaciones del aparato de medida, ya sea por acoplamiento directo (como indica esquemáticamente la figura 8), o por accionamiento de aceite a presión con objeto de exigir un menor esfuerzo al aparato de medida.

3.º El servomotor C que, accionado por el aceite a presión que viene de la válvula B, actúa sobre la admisión o distribuidor de la turbina.

4.º El mecanismo de retorno D, el cual relaciona la posición del distribuidor de la turbina con el equilibrio del regulador, con objeto de adelantar el cierre de la válvula de accionamiento y alcanzar antes la nueva posición de equilibrio. Con este mecanismo, la velocidad que se regula se convierte en una función decreciente de la carga de la máquina.

211. *Característica de regulación.*—La característica de regulación viene determinada por la relación entre la velocidad regulada y la carga de la máquina, que, en representación gráfica, es aproximadamente una recta más o menos descendente (fig. 9). Cada punto

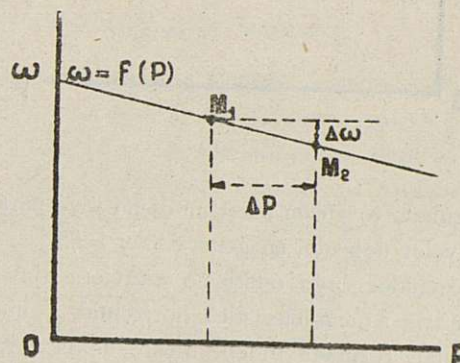


Fig. 9

de la característica representa un régimen de funcionamiento estable de la máquina en que el regulador está en equilibrio, y el paso de un punto  $M_1$  a otro  $M_2$  (fig. 9), representa un cambio de régimen de la máquina obedeciendo a su regulador primario.

Si en un cambio de régimen (de  $M_1$  a  $M_2$ , fig. 9) consideramos los incrementos  $\Delta \omega$  y  $\Delta P$  expresados en tanto por uno de los valores de  $\omega$  y  $P$  en régimen normal a plan carga, tendremos:

$$\Delta \omega = - P \operatorname{tg} \theta$$

y haciendo:

$$\delta = \operatorname{tg} \theta$$

resulta

$$\Delta \omega + \delta \Delta P = 0 \quad (20)$$

que es la expresión analítica de la característica del regulador.

Cuando, por una causa cualquiera, el nuevo punto de funcionamiento  $M_2$  se aparta de la característica, el regulador queda desviado de su posición de equilibrio y actúa buscando otro punto sobre la característica.



El desvío o desviación del regulador lo designaremos por  $\epsilon$  y vale (fig. 10),

$$\epsilon = \Delta \omega + \delta \Delta P \quad (21)$$

El coeficiente  $\delta$  de las fórmulas (20) y (21) se llama grado de estatismo, o simplemente *estatismo*,

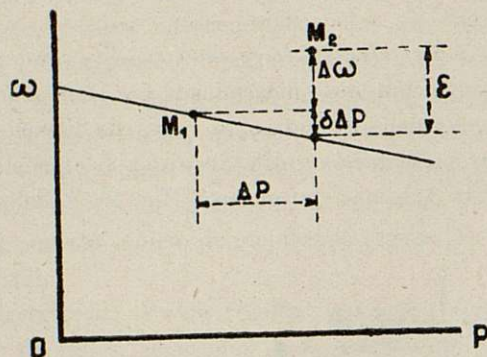


Fig. 10

y los reguladores suelen tener un dispositivo para ajustarlo al valor deseado, en general 0 y 5 %.

Un regulador cuyo estatismo estuviera ajustado a 0 % tendría su característica horizontal, y quedaría la velocidad regulada independiente de la carga. Es el llamado regulador «estático», en el que la velocidad regulada es completamente constante, pero presenta una marcada tendencia a las oscilaciones y, en ciertas condiciones, éstas pueden ser amplificadas haciendo inestable el funcionamiento de la máquina (véase Apéndice II). Además, no permite una repartición estable de la carga entre varias máquinas en paralelo.

El regulador «estático», es decir, el que posee un cierto estatismo  $\delta$ , no puede por sí solo regular la velocidad a un valor completamente constante; pero permite una repartición estable de la carga cuando la máquina funciona en paralelo con otras (véase Apartado 24).

Al aumentar el estatismo  $\delta$ , aumenta la estabilidad de la regulación; pero, como también aumenta la caída de la velocidad con la carga, se construyen reguladores primarios compensados, por medio de «dash-pots» y resortes, de forma que el retorno sólo tiene efecto en los primeros momentos de la regulación; así el estatismo es transitorio. Este es el regulador isódromo (de igual velocidad).

212. *Insensibilidad.*—Otra constante muy importante del regulador es su insensibilidad; esto es, la

desviación mínima necesaria para que el regulador actúe. En los reguladores primarios, su valor acostumbra a ser del orden de 0,1 %.

Como esta insensibilidad puede ser en cada uno de los dos sentidos (positivo o negativo), la característica de regulación (fig. 9), en lugar de ser una recta, es una faja (fig. 11), cuya anchura vertical es el doble de la insensibilidad  $2i$ , expresada en tanto por uno.

Teniendo en cuenta la insensibilidad del regulador, la ecuación característica (20) queda transformada en

$$-i < \Delta \omega + \delta \Delta P < i \quad (22)$$

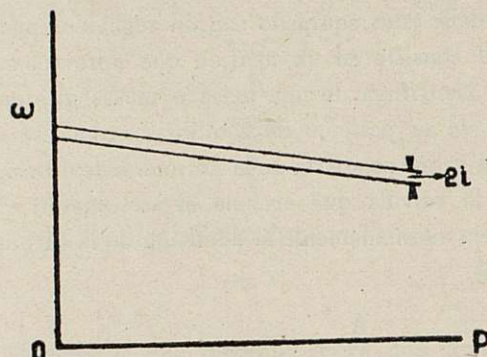


Fig. 11

213. *Regulador con acelerómetro.*—Una manera muy eficaz de adelantar el cierre de la válvula de accionamiento B (fig. 8) consiste en agregar un segundo aparato de medida, cuya posición dependa de la aceleración angular de la máquina. En esencia, este segundo aparato no es más que un dispositivo agregado al péndulo A, que consiste en una masa que gira loca sobre el eje del aparato y está unida a él con unos resortes que limitan su desplazamiento angular. Este desplazamiento acciona la válvula B (figura 8).

En el Apéndice II se expone un estudio analítico del caso general de un regulador estático con acelerómetro. Para concretar, supongamos se trata de un aumento de carga; al principio disminuirá de velocidad; entonces, el acelerómetro actuará abriendo el distribuidor; pero, tan pronto la máquina se acelere, el acelerómetro empezará a cerrar el distribuidor, aunque la velocidad sea inferior a la normal.

Así, un regulador primario con acelerómetro (regulador taqui-aceleramétrico o acelero-taquimétrico) instalado en una máquina que funcione en paralelo con otras, permite ajustar su estatismo al valor 0 %,



proporcionándole así una característica completamente estática, sin peligro de oscilaciones. Pero si la máquina funciona en paralelo con otras, a pesar de que el acelerómetro contribuye eficazmente a combatir las oscilaciones, el estatismo es necesario para una repartición estable de la carga entre las máquinas en paralelo.

Para un regulador con acelerómetro, la fórmula (21) que determina el desvío del regulador debe modificarse agregándole un tercer término que representa el efecto del acelerómetro, y queda transformada en la siguiente:

$$\varepsilon = \Delta \omega + \delta \Delta P + m \frac{d}{dt} \Delta \omega \quad (23)$$

En este tercer término,  $\frac{d}{dt} \Delta \omega$  es la aceleración de la máquina, su coeficiente  $m$  representa la relación entre el efecto aceleramétrico y el taquimétrico del regulador; es decir, para que un incremento suplementario de velocidad  $\Delta \omega$  proporcionase el mismo efecto que la aceleración  $\frac{d}{dt} \Delta \omega$ , tendría que ser un valor  $m$  veces superior (expresando las magnitudes en tanto por uno).

214. *Accionamiento del regulador.*—El regulador debe ser accionado por la propia máquina que regula, en forma que las velocidades sean proporcionales, participando el regulador de toda aceleración y oscilación de la máquina. La tendencia moderna viene a substituir el antiguo acoplamiento con correa, por los eléctricos.

En principio, el acoplamiento eléctrico más adecuado parece debería estar formado por un motor síncrono que accionase sobre el regulador y alimentado por un alternador-piloto instalado sobre el mismo eje de la máquina. Pues bien, la experiencia ha demostrado que el presentarse oscilaciones pendulares en la máquina, debidas a una perturbación cualquiera, el motor síncrono del regulador sigue estas oscilaciones amplificándolas. La explicación de este fenómeno está en la teoría de las oscilaciones pendulares de amplitud creciente, en las máquinas sincrónicas que funcionan en paralelo. Según esta teoría, la amplitud creciente tiene lugar con cargas nulas o muy bajas y con acoplamientos entre las máquinas donde predomina la

resistencia ohmica sobre la reactancia. Estas dos condiciones precisamente se cumplen en este caso.

La amplificación de estas oscilaciones no se evitaría construyendo el motor síncrono de mayor potencia, pero sí equipando este motor con circuitos amortiguadores. Sin embargo, los constructores lo han resuelto en forma más práctica, substituyendo el motor síncrono por uno de inducción de jaula de ardilla, de una potencia muy superior a la necesaria, y con unas ranuras en el motor que facilitan la formación de polos remanentes. De este modo, el deslizamiento puede considerarse nulo y la jaula del rotor evita la amplitud creciente en las oscilaciones.

## 22.—CASO DE UNA SOLA MÁQUINA

Toda máquina que alimenta aisladamente una carga funciona a la velocidad impuesta por su regulador. Si la máquina no debe trabajar en paralelo con ninguna otra, su regulador puede ser estático, si está provisto de acelerómetro; en caso contrario, debe ser estático, para asegurar una regulación estable. Entonces, la velocidad y frecuencia de régimen de la máquina dependerán de su carga, de acuerdo con la característica de regulación (fórmula 20, fig. 9). Debido a la proporcionalidad entre velocidad y frecuencia, estas dos magnitudes vendrán expresadas con los mismos valores en el sistema de unidades de tanto por uno y la característica de regulación (20) puede escribirse:

$$\Delta f + \delta \Delta P = 0 \quad (24)$$

Suponiendo un estatismo de 4 % ( $\delta = 0,04$ ), y variaciones del 10 % en la carga ( $\Delta P = + 0,1$ ), la ecuación (24) nos da  $\Delta f = \pm 0,004$ . Si la frecuencia normal es de 50 períodos por segundo, la variación absoluta de la frecuencia sería de 0,2 períodos.

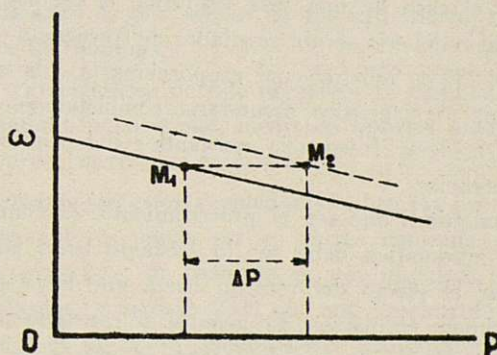


Fig. 12



En general, basta la regulación primaria; pero, si por tener grandes variaciones en la carga u otro motivo, conviene lograr una frecuencia más constante, hay que corregir el efecto del regulador primario. Esta corrección equivale a desplazar la característica de regulación (fig. 9) paralelamente a sí misma, hasta el nuevo punto  $M_2$  de funcionamiento (fig. 12). Esto es lo que se llama «compensación».

En general, esta compensación se realiza actuando manual o automáticamente sobre los órganos de enlace del mecanismo de retorno. Esto equivale a anular total o parcialmente el estatismo del regulador primario; por esto, la compensación debe efectuarse después de la operación del regulador primario para no mermar el estatismo en los primeros momentos y no perjudicar la estabilidad de la regulación.

221. *Compensación manual.*—En los casos de una sola máquina, en general, puede lograrse la suficiente compensación actuando sobre el regulador primario, por medio de un motorcito eléctrico u otro servomotor maniobrado a mano por el operador de la central, al ver que la frecuencia ha quedado desviada de la normal. La maniobra de este motorcito eléctrico puede hacerse a distancia desde el cuadro de maniobra o cerca de la misma máquina si la poca importancia de la instalación no justifica las maniobras a distancia.

222. *Compensación automática.*—Si las variaciones de carga son demasiado fuertes y frecuentes de modo que no bastase la compensación manual, habría que recurrir a la automática. Entonces, precisa un «regulador secundario» para actuar el motorcito eléctrico o servomotor que maniobraba el operador de la central en el caso anterior, pero con mucha mayor precisión.

En el caso de una sola máquina, el regulador secundario debería ser un regulador de frecuencia (Apartados 232 y 233); el cual proporcionaría a la máquina una característica secundaria completamente astática; es decir, frecuencia constante e independiente de la potencia.

Cualquiera que sea el procedimiento, la compensación automática debe ser lo bastante lenta para no anular el efecto del retorno hasta que haya pasado la primera regulación. En general, se consigue mediante un mando por impulsos sobre el enlace del retorno (véase Apartado 231).

Generalmente, en los casos de una sola máquina no precisa la compensación automática, y, por lo tanto, el regulador secundario.

223. *Compensación espontánea.*—La caída de frecuencia con la carga puede también compensarse mediante «dash-pot» y resortes instalados en los órganos de enlace del retorno que hacen que el estatismo sea transitorio. Esto puede considerarse como una compensación espontánea que forma parte del propio regulador primario. Este es el caso de los reguladores isódromos.

## 23.—REGULADORES SECUNDARIOS

Los reguladores secundarios tienen por objeto compensar automáticamente (Apartado 222) los reguladores primarios para conseguir una regulación de frecuencia con características astática o con muy poco estatismo, repartiendo la carga en la forma más conveniente y regulando al propio tiempo, si es preciso, la carga de las interconexiones.

Para conseguir esto, el regulador secundario propiamente dicho o aparato de medida va acompañado de dispositivos auxiliares, formando un conjunto que obedece a métodos de regulación secundaria (Apartado 25). Estos métodos dependen de cada caso particular, pero exigen siempre un regulador de frecuencia por lo menos (Apartados 232 y 233).

231. *Sistemas de mando.*—El regulador secundario debe actuar, en definitiva, corrigiendo la admisión de las turbinas; esto se consigue dándole mando sobre los órganos de enlace del retorno de los reguladores primarios, o bien, con mando directo sobre los servomotores. El primer caso, es el de la compensación automática de los reguladores primarios (Apartado 222); en el segundo caso, el mando puede ser tan rápido que anule por completo todo el efecto del regulador primario. En uno y otro caso, el mando puede ser de dos sistemas: actuante por impulsos eléctricos o en forma continua.

De lo dicho, se desprende que teóricamente hay cuatro sistemas de mando:

- 1.º Compensación por impulsos.
- 2.º Compensación continua.
- 3.º Impulsos sobre el servomotor.
- 4.º Mando continuo sobre el servomotor.



Sin embargo, agruparemos estos sistemas en dos: mando lento y mando rápido.

El mando lento tiene por objeto la compensación del regulador primario. En general, se hace por medio de impulsos eléctricos igualmente espaciados y de duración proporcional a la desviación del regulador, que, actuando sobre un motorcito eléctrico, modifica el enlace de retorno. Aunque no es corriente, este mando también podría efectuarse en forma continua, con la condición de que sea de la suficiente lentitud.

Cualquiera que sea el procedimiento, la compensación debe ser de la suficiente lentitud para no provocar oscilaciones en la regulación.

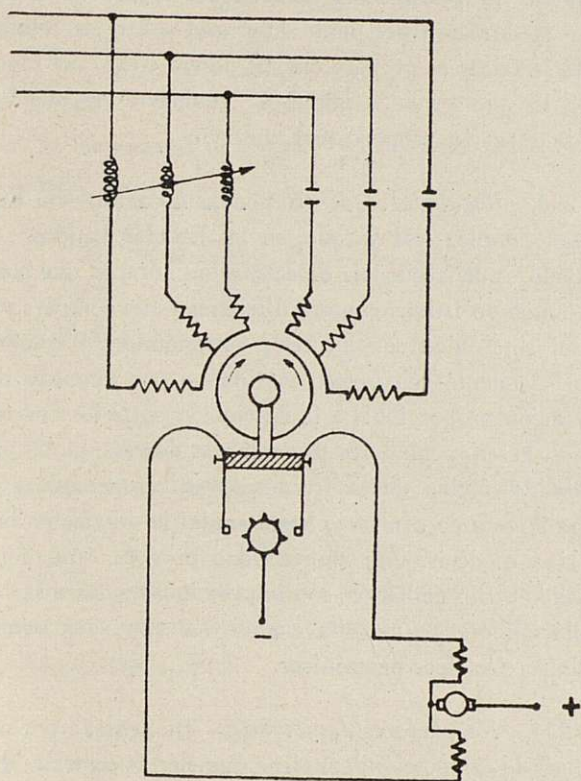


Fig. 13

El mando rápido tiene por objeto anular el efecto del regulador primario y confiar toda la regulación al secundario. En este caso, el regulador primario sólo tiene efecto cuando la máquina no está en paralelo con las demás.

Tiene la ventaja de la rapidez; pero anula total o parcialmente el estatismo del regulador primario, lo que perjudica la estabilidad de la regulación. En ge-

neral, se logra actuando directamente sobre el servomotor en forma continua.

El mando por impulsos sobre el servomotor sería un mando lento, que no es corriente en esta forma.

El empleo de uno u otro mando debe estudiarse para cada caso particular. Pero, generalmente, se emplea más el mando lento por asegurar mejor la estabilidad de la regulación.

232. *Reguladores de frecuencia.*—En general, los reguladores de frecuencia se fundan en el fenómeno de resonancia eléctrica; en principio, están formados por un motorcito de inducción con rotor en cortocircuito y el estator con dos devanados trifásicos, cuyos campos giran en sentido contrario. Las tres fases de uno de estos devanados se alimentan a través de bobinas de inductancia  $L$ , y las del otro devanado a través de condensadores de capacidad  $C$  (fig. 13). Las resistencias son pequeñas al lado de las reactancias y se pueden despreciar, resultando que las corrientes  $I_L$  e  $I_C$  de los devanados valen:

$$I_L = \frac{U}{2\pi fL}$$

$$I_C = 2\pi fCU$$

El rotor estará en equilibrio, cuando los pares proporcionados por los dos devanados sean iguales, o sea, cuando

$$I_L = I_C$$

$$\frac{U}{2\pi fL} = 2\pi fCU$$

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

El ajuste de la frecuencia que regula se consigue modificando  $L$  por medio de un entrehierro regulable en las bobinas.

La característica de este regulador es completamente astática; no obstante, mediante resortes antagonistas, puede convertirse en estático.

El mando de estos reguladores sobre los primarios o servomotores puede ser en forma continua o mediante impulsos; en caso de ser por impulsos, ya se ha indicado (Apartado 231) que son igualmente espaciados y de duración sensiblemente proporcional a la desviación del regulador secundario.

Estos impulsos pueden obtenerse con un aparato



adicional adecuado. Un sencillo dispositivo, para este objeto, puede conseguirse mediante dos contactos solidarios con el eje del regulador de frecuencia (figura 13) y aislados del mismo, de modo que, al girar éste, uno u otro de los contactos va tocando las puntas de una ruedecita en forma de estrella que gira a velocidad constante, estableciendo los impulsos.

La casa «Brown Boveri» construye reguladores de frecuencia de este sistema, cuyo eje acciona unos sectores circulares que ruedan sobre los contactos de unos reóstatos (fig. 14), en la misma forma que los conocidos reguladores de excitación «Brown Boveri». Por estos reóstatos circula una corriente adecuada para el sistema de mando continuo.

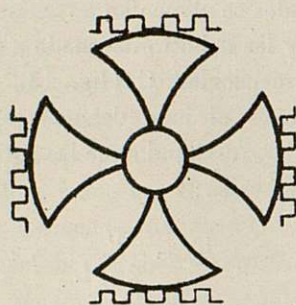


Fig. 14

En las redes interconectadas de París se emplea un ingenioso regulador de frecuencia de estatismo perfectamente ajustado, con mando de impulsos que se consiguen por medio de un sistema óptico, en la siguiente forma:

El regulador está formado por dos equipos giratorios en un mismo eje vertical con desplazamientos angulares independientes uno del otro. Uno de estos equipos es el frecuencímetro, cuyo desplazamiento angular depende de  $\Delta f$ , y el otro, un galvanómetro recorrido por una corriente continua proporcional al incremento de la potencia  $\Delta P$ . Estos dos equipos móviles llevan solidarios sendos espejitos que giran alrededor del mismo eje vertical.

Un rayo luminoso incide sobre el espejo del galvanómetro y después de reflejarse en un espejo cilíndrico, coaxial, con el eje de rotación del aparato, incide sobre el espejo del frecuencímetro, reflejándose sobre una u otra de dos células fotoeléctricas. Una de estas células se emplea para provocar un aumento de potencia y la otra para provocar una disminución.

Se comprende fácilmente que el desvío angular  $\epsilon$  del rayo luminoso obedece a la fórmula

$$\epsilon = \Delta f + \delta \Delta P \quad (25)$$

y que la característica de regulación es estática y perfectamente lineal

$$\Delta f + \delta \Delta P = 0 \quad (26)$$

cuyo estatismo  $\delta$  puede ajustarse con gran precisión regulando un «shunt» del galvanómetro. Basta inmovilizar el galvanómetro para convertir la característica de regulación en astática.

Un obturador movido por un motor de velocidad regulable consigue que el rayo luminoso sea intermitente. El perfil de la pantalla del obturador es tal que la duración del punto luminoso sobre las células fotoeléctricas es proporcional al desvío  $\epsilon$  (25) del rayo, por lo que produce impulsos igualmente espaciados y de duración proporcional al desvío  $\epsilon$ .

233. *Reguladores de frecuencia horarios.*—Se emplean también, sobre todo, en los Estados Unidos, reguladores de frecuencia de desviación horaria, que consisten en un frecuencímetro diferencial que compara un reloj sincrónico con un reloj astronómico, accionando los mandos en forma continua o por impulsos de duración proporcional a la desviación entre los dos relojes. Estos reguladores presentan la desventaja de que toda desviación en la frecuencia es compensada con otra de sentido contrario hasta anular la desviación horaria; es decir, una anomalía provoca otra anomalía. Sin embargo, son imprescindibles para la regulación que se necesita cuando los abonados tienen relojes eléctricos sincrónicos.

234. *Reguladores de potencia.*—En general, por razones de explotación, conviene que ciertas centrales del sistema hagan carga constante durante cierto tiempo. En tal caso, la compensación de los reguladores primarios debe obedecer a los llamados reguladores de potencia, que, en esencia, no son más que «relés» watimétricos que tienen mando por impulso o en forma continua sobre los reguladores primarios o servomotores.

En caso de redes interconectadas, conviene regular la potencia de las líneas de interconexión, para lo que son necesarios reguladores mixtos de frecuencia y potencia (véase Apartado 28).



## 24.—REGULACIÓN PRIMARIA DE VARIAS MÁQUINAS EN PARALELISMO

Aun en los casos que las necesidades de la regulación exijan un regulador secundario, entendemos que toda máquina debe tener siempre un regulador primario en servicio.

Supongamos el caso de un sistema eléctrico de  $n$  máquinas en paralelo, con sus reguladores primarios que supondremos de característica estática. Al presentarse un incremento (positivo o negativo) en la demanda, habrá una variación en la velocidad de todos los grupos y la potencia de cada uno de ellos variará de acuerdo con una característica de regulación:

$$\Delta f + \delta_i \Delta P_i = 0 \quad (27)$$

$$\Delta P_i = - \frac{\Delta f}{\delta_i} \quad (28)$$

El incremento de carga en el conjunto de las  $n$  máquinas, será:

$$\Delta P = \sum_1^n \Delta P_i = - \Delta f \sum_1^n \frac{1}{\delta_i} \quad (29)$$

y haciendo

$$\frac{1}{\delta} = \sum_1^n \frac{1}{\delta_i} \quad (30)$$

se encuentra la siguiente variación de la frecuencia:

$$\Delta f = - \delta \Delta P \quad (31)$$

Substituyendo este valor (31) en la (28), se encuentra que el incremento de carga en cada máquina vendrá expresado por:

$$\Delta P_i = \frac{\delta}{\delta_i} \Delta P \quad (32)$$

Comparando la fórmula (31) con la (24) y observando además la (32), fácilmente se comprende que el sistema eléctrico se comportará como una máquina única cuya regulación tenga el estatismo  $\delta$ , determinado por la fórmula (30), y que el incremento de carga se repartirá entre las máquinas inversamente proporcional a sus propios estatismos  $\delta_i$ .

Expresando las magnitudes en tanto por uno y tomando como base de potencias las de plena carga de la máquina correspondiente, la fórmula (28) nos indica

que: ajustando todos los reguladores al mismo estatismo, el incremento de la carga se repartirá con igual tanto por uno en cada máquina; o lo que es lo mismo, proporcionalmente a la potencia de cada una de ellas.

Para disminuir el estatismo del conjunto, conservando la buena repartición de las variaciones de carga, deberíamos disminuir simultáneamente el estatismo de todas las máquinas. El límite de esta disminución viene fijado por la insensibilidad de los reguladores.

Así, el desvío máximo que puede soportar un regulador sin que actúe será:

$$\varepsilon = \pm i \quad (33)$$

resordando la fórmula (21) y teniendo en cuenta que la velocidad no varía, resulta:

$$\begin{aligned} \delta \Delta P &= \pm i \\ \Delta P &= \pm \frac{i}{\delta} \end{aligned} \quad (34)$$

La que nos dice que, debido a la insensibilidad, las máquinas que funcionan en paralelo presentan una indeterminación de  $+\Delta P$  a  $-\Delta P$  en la carga que toman en un cambio de régimen. La zona de esta indeterminación representa una fluctuación de carga

$$\Delta_e P = 2 \Delta P = \frac{2i}{\delta} \quad (35)$$

Con esta fórmula se comprende la imposibilidad del empleo de reguladores estáticos para máquinas en paralelo; ya que, al ser  $\delta$  nulo la variación  $\Delta_e P$  podría llegar a ser teóricamente infinita.

Empleando reguladores primarios con acelerómetro, podría prescindirse del retorno; pero por lo indicado, el estatismo sólo podría reducirse lo que permite la fórmula (35) de acuerdo con la insensibilidad y la zona de interminación  $\Delta_e P$  que se puede tolerar.

Para el caso de un sistema sin interconexiones de empresas diferentes, en general, es muy suficiente una regulación primaria con reguladores de velocidad estáticos individuales, tal como se ha expuesto, compensando a mano las variaciones más fuertes de la carga. Sólo en casos especiales, como, por ejemplo, en redes con grandes y frecuentes variaciones de carga o con relojes eléctricos sincrónicos será necesario el empleo de reguladores secundarios.



Supongamos un sistema de  $n$  máquinas en paralelo, equipadas todas ellas de reguladores primarios estáticos, pero de modo que las exigencias de la regulación no pueden ser satisfechas por estos reguladores. La regulación secundaria debe proporcionarnos una regulación estable de cada máquina con frecuencia constante y mantener una correcta repartición de la carga entre las máquinas.

Para estudiar esta regulación secundaria, observemos que en todo régimen (despreciando las pérdidas), la carga  $P$  se reparte entre las  $n$  máquinas, verificándose:

$$\sum_{i=1}^n P_i = P \quad (36)$$

Lo que representa una sola condición entre los  $n$  valores  $P_i$  de la carga de las  $n$  máquinas. Luego, para que la repartición no sea indeterminada, hacen falta  $n - 1$  relaciones más, que deben obtenerse de las características de los reguladores secundarios o de ligazones que deberían instalarse entre las cargas de las máquinas.

251. *Regulación estática individual.*—Para la regulación secundaria, lo primero que se ocurre es equipar cada máquina con un regulador de frecuencia estático. Las  $n$  características de estos reguladores serían que la frecuencia  $f_i$  de cada máquina sea constante, lo que puede expresarse de la forma:

$$f_i = f_0 \quad i = 1, 2, 3, \dots \dots \dots n \quad (37)$$

Esto no nos proporciona ninguna relación entre los  $n$  valores  $P_i$  de la fórmula (36). Luego, para que la repartición de la carga sea determinada, hacen falta  $n - 1$  ligazones entre las  $n$  máquinas.

Si las  $n$  máquinas pertenecen a una misma central, fácil sería concebir estas  $n - 1$  ligazones por medio de circuitos eléctricos. Pero, en caso de pertenecer a centrales distintas, sería preciso emplear sistemas de teledirigida y de telemando, para lo que ofrecerían un medio eficaz los sistemas de ondas portantes por altas frecuencias.

Como no es posible prescindir de las ligazones entre las máquinas o centrales, este método no ofrece interés, ya que con estas ligazones puede adoptarse

el sistema de regulador secundario único (véase Apartado 255).

252. *Regulación estática individual.*—Este método consiste en equipar cada máquina de un regulador de frecuencia estático, cuyas características pueden representarse de la forma general

$$f_i = F_i (P_i) \quad (38)$$

siendo  $F_i$  una función decreciente.

Por funcionar las  $n$  máquinas en paralelo, la frecuencia  $f_i$  debe ser igual en todas ellas, teniendo las  $n$  ecuaciones siguientes:

$$f = F_i (P_i) \quad i = 1, 2, \dots \dots \dots n \quad (39)$$

Estas  $n$  ecuaciones junto con la (36) forman  $n + 1$  ecuaciones, con las  $n$  variables  $P_i$  y la  $f$ , quedando, por lo tanto, estas  $n + 1$  variables perfectamente determinadas.

Resulta ahora, que  $f$  depende de la carga total  $P$ , como natural consecuencia del estatismo; lo que es un inconveniente, ya que el objeto de la regulación secundaria es, precisamente, obtener una frecuencia constante.

Para estudiar ahora la repartición de cargas entre las máquinas, observemos la (39) y, si designamos por  $\psi_i$  las funciones inversas a las  $F_i$ , tendremos:

$$P_i = \psi_i (f) \quad i = 1, 2, 3, \dots \dots \dots n \quad (40)$$

Para conseguir una repartición proporcional de la carga  $P$ , es preciso que los valores de  $P_i$  expresados en tanto por uno de la plena carga de cada máquina sean iguales, lo que se consigue cuando  $\psi_i$ , expresada en tanto por uno, sea igual para cada máquina, o sea, con características rigurosamente idénticas, de todos los reguladores secundarios.

Además de esta condición, también es indispensable que sean idénticos los mandos de los reguladores sobre sus máquinas; pues, en caso contrario, sus efectos no serán simultáneos, y se originarían oscilaciones en la repartición de cargas.

Para que la frecuencia pueda ser prácticamente constante, es preciso que la insensibilidad del regulador sea muy pequeña y poder permitir así muy poco estatismo. (Fórmula 35.)

En caso de  $n$  centrales en paralelo puede estudiarse como  $n$  máquinas substituyendo cada central por



una máquina ficticia equivalente. Entonces, al aplicar de este modo, tendríamos  $n$  centrales, con un regulador de frecuencia estático en cada una, y se podría estudiar cada central aplicando el método de regulador secundario único. (Apartados 263 y 264.)

Para el caso de central única con  $n$  máquinas, este método no tiene interés, por exigir un regulador secundario en cada máquina. Entonces será más adecuado el método de regulador secundario único.

253. *Regulación astática de una unidad.*—Si una de las  $n$  máquinas en paralelo está equipada con un regulador de frecuencia astático, éste actuará sobre la compensación del primario, y quedará la frecuencia regulada a su valor normal  $f_0$ ; esto es,

$$f = f_0 \quad (41)$$

Las  $n - 1$  máquinas restantes sólo tendrán el regulador primario y sin actuar sobre la compensación. Las  $n - 1$  ecuaciones características de regulación primaria, pueden expresarse:

$$f - f_0 + \delta_i \Delta P_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (42)$$

La repartición de la carga entre las  $n$  máquinas debe obedecer a la condición (36), que para mejor comodidad la expresaremos por los incrementos de carga  $\Delta P_i$ , que toma cada máquina.

$$\sum_1^n \Delta P_i = \Delta P \quad (43)$$

Las condiciones (41, 42 y 43) forman  $n + 1$  ecuaciones entre  $f$  y los  $n$  valores de  $\Delta P_i$ , encontrando fácilmente:

$$\Delta P_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (44)$$

$$\Delta P_n = \Delta P \quad (45)$$

Esto es, todo incremento de carga  $P$  será tomado por la máquina-piloto, y las otras funcionarán con carga constante.

En el primer momento, mientras tanto haya actuado la regulación secundaria, el incremento de carga  $\Delta P$  se repartirá en forma natural entre las máquinas (fórmula 32), y, al volver la frecuencia a su valor normal, todas las máquinas volverán a su primitiva potencia, a excepción del piloto.

254. *Método del estatismo virtual.*—Este método se basa en instalar un regulador de frecuencia está-

tico en cada unidad, que supondremos de característica lineal, disponiendo en cada uno de ellos de la medida de potencia  $P_i$  que suministra la máquina correspondiente y de la  $P'_i$  que debería suministrar para una correcta repartición de la carga.

La repartición de carga será correcta cuando  $P_i$  obedezca a una función de la carga total  $P$ , fijada de antemano:

$$P'_i = F_i(P) \quad (46)$$

Por definición de  $P'_i$ , se tiene:

$$\sum_1^n P'_i = P \quad (47)$$

En general,  $P'_i$  es una parte alícuota de  $P$ ; en tal caso la (46) podrá escribirse:

$$P'_i = \lambda_i P \quad (48)$$

Supongamos ahora que cada máquina toma una carga  $P_i$  distinta de la correcta  $P'_i$ ; es decir, su potencia sufre una desviación

$$\Delta P_i = P_i - P'_i \quad (49)$$

Por cumplirse las (36 y 37), se verificará que la suma de todas las desviaciones debe ser nula

$$\sum_1^n \Delta P_i = 0 \quad (50)$$

Por hipótesis, los reguladores de frecuencia de cada máquina están ajustados a la misma frecuencia  $f_0$ , y son de característica lineal referida a la desviación de potencia  $\Delta P_i$  de la máquina correspondiente. La expresión analítica de estas  $n$  características será, pues:

$$f - f_0 + \delta_i \Delta P_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (51)$$

En este método la ecuación (36) está substituída por la (50), que junto con las (51) forman las  $n + 1$  ecuaciones; de las cuales se despejan fácilmente  $f$  y  $\Delta P_i$ , como sigue:

$$\Delta P_i = - \frac{f - f_0}{\delta_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (52)$$

$$0 = \sum_1^n \Delta P_i = (f_0 - f) \sum_1^n \frac{1}{\delta_i} \quad (53)$$

Como los  $n$  valores de  $n\delta_i$  son positivos, resulta:

$$f = f_0 \quad (54)$$

$$\Delta P_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (55)$$



Demostrando que a pesar de la característica estática de los reguladores secundarios, la frecuencia queda regulada a un valor constante  $f_0$  e independiente de la carga, lo que justifica la denominación de estatismo virtual. Simultáneamente con la frecuencia, se regula la potencia de cada máquina al valor previsto  $P'_i$ .

Este método exige circuitos eléctricos para que cada regulador tenga la medida de la potencia de su máquina y la del conjunto. Si todas las máquinas pertenecen a una misma central es fácil concebir estos circuitos; pero, en caso de pertenecer a centrales distintas, habrá necesidad de utilizar los sistemas de telemedida. Como cada regulador sólo tiene mando sobre su propia máquina, no hacen falta los sistemas de telemando.

En la regulación de interconexiones de redes, puede emplearse este método refiriendo el estatismo virtual a la potencia activa de las interconexiones (véase Apartado 28).

El sistema de mando empleado es, en general, el de compensación por impulsos (Apartado 231).

Como el estatismo es virtual y no repercute sobre el valor de la frecuencia regulada, no hace falta un estatismo tan bajo como en el método (252) y, por lo tanto, reguladores secundarios de tanta precisión.

255. *Regulador secundario único.*—Consiste en utilizar un regulador único y darle mando a todas las máquinas, haciéndole compensar los reguladores primarios individuales de todas ellas, o bien, actuando directamente sobre los servomotores de las turbinas, ya sea en forma continua o por impulsos; en general, se emplea el mando de compensación por impulsos. Esto es fácil de realizar eléctricamente cuando se trata de máquinas de una sola central, pero, cuando se trata de varias centrales, hay que recurrir a los sistemas de telemedida y de telemando.

Como ejemplo, puede citarse el caso de las redes interconectadas de París, cuya regulación quedó resuelta en junio de 1937, mediante un regulador de frecuencia único centralizado (véase Apartado 232), con sistemas de telemedida y telemando a impulsos, por medio de ondas portantes con frecuencias moduladas sobre las líneas de alta tensión.

## 26.—CASO DE UNA CENTRAL ÚNICA

En el caso de una central única con varias máquinas, éstas deberán equiparse con reguladores primarios estáticos iguales con o sin acelerómetro en todos ellos. Los estatismos  $\delta_i$  deben ajustarse a valores iguales expresados en tanto por uno, tomando como base de potencias la de plena carga de la máquina correspondiente (Apartado 24). Esto proporciona una correcta regulación primaria, que, en general, satisface las necesidades de explotación.

Las variaciones de carga dependen de las características de la red. En la mayoría de casos de central única, se tratará de una fábrica o un ferrocarril que posee central propia, y las necesidades de la fabricación o tracción podrán aconsejar o no la regulación secundaria.

Generalmente, las variaciones de frecuencia correspondiente a las fuertes variaciones de carga podrán ser compensadas por la intervención manual del operador de la central (Apartado 221). En el caso especial de que la central alimente relojes eléctricos sincrónicos, será necesaria una regulación secundaria, precisamente a base de un regulador de frecuencia horario (Apartado 233).

En caso de ser necesaria la regulación secundaria, no se consideran indicados los métodos de regulación individual astática o estática, por los motivos ya expuestos (Apartados 251 y 252), y, en cambio, están indicados los otros métodos (Apartado de 253 a 255).

261. *Regulación astática de una de las máquinas.*—Consiste en instalar un regulador de frecuencia astático en una de las máquinas, denominada máquina-guía o piloto. Esta máquina mantendrá constante la frecuencia, y las otras suministrarán una carga fija, de acuerdo con un programa previamente establecido (Apartado 253).

Al presentarse una variación de carga, ésta será tomada por la máquina-piloto, y quedará la frecuencia constante, una vez esto efectuado. En cuanto a las otras máquinas, aunque al principio del cambio de régimen hayan contribuido más o menos en la variación de carga, en definitiva, ésta quedará invariable, por la característica estática de sus reguladores primarios y por ser constante la frecuencia. Por esto, no son necesarios reguladores de potencia (Apartado 234).

Este sistema presenta el inconveniente de que la



máquina-piloto hará distinta carga de las demás, lo que empeora el rendimiento global de la central; además, las variaciones de carga sólo son suministradas por una sola máquina. No obstante, por su sencillez, puede aconsejarse en aquellos casos en los que convenga una frecuencia rigurosamente constante, como, por ejemplo, cuando se alimentan relojes eléctricos sincrónicos.

Se puede hacer que la carga de la máquina-piloto influya, a su vez, en la carga de las demás, en forma que todas ellas lleven el mismo porcentaje de carga. En tal caso, el mando de la máquina-piloto sobre las demás debe ser por impulsos sobre la compensación de los reguladores primarios, para evitar las oscilaciones en la regulación.

Como esto exige ligazones entre las máquinas, en general, se prefiere que el regulador de frecuencia tenga mando directo a todas las máquinas (Apartados 263 y 264).

262. *Regulación con estatismo virtual.*—Por pertenecer todas las máquinas a una misma central, fácil será aplicar el principio del estatismo virtual (Apartado 254). Bastará proveer a cada regulador secundario de un «relé» watimétrico diferencial W (fig. 15), que mida la desviación  $\Delta P_i$  de la potencia de la máquina, el cual reaccione sobre el regulador secundario S proporcionándole el estatismo.

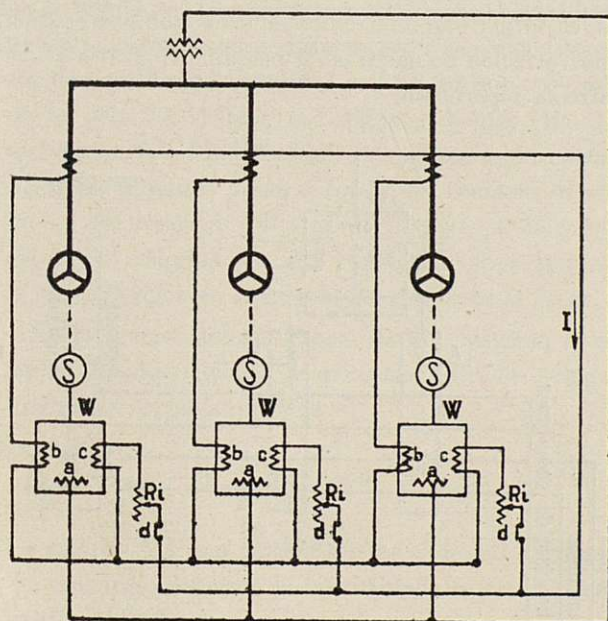


Fig. 15

Tratándose de una sola central, puede cambiarse el procedimiento empleando sólo un regulador de frecuencia estática (con  $n$  mandos regulados por los «relés» watimétricos diferenciales (fig. 16). El grado de estatismo se regula por el reóstato  $r$ .

El «relé» watimétrico diferencial contiene un devanado voltimétrico  $a$  (fig. 15) y otros dos devanados

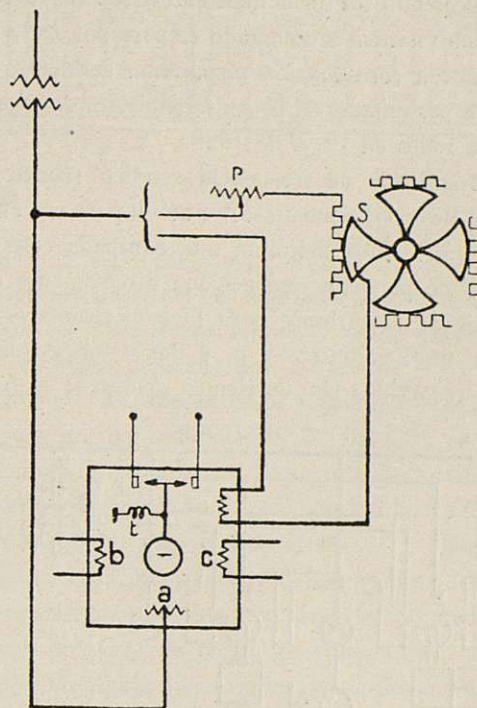


Fig. 16

amperimétricos  $b$  y  $c$  de efectos iguales y opuestos, en tal forma que miden la diferencia de las corrientes activas que circulan por los devanados  $b$  y  $c$ . Esta diferencia es, precisamente, la desviación  $\Delta P_i$  (fórmula 49) de la potencia de la máquina.

Las resistencias  $R_i$  (fig. 15) deben ajustarse a valores inversamente proporcionales a las potencias de plena carga de cada máquina (véase Apartado 265).

La desconexión de una o más máquinas exigiría un nuevo ajuste de los «relés» watimétricos. Esto es una complicación del método, porque no se puede confiar esta misión al personal sin que, tarde o temprano, se olviden de ella, por lo que es necesario recurrir a dispositivos automáticos.

Uno de estos dispositivos puede consistir en agregar los contactos  $d$  (fig. 15) que se abren automáticamente al desconectar el interruptor de la máquina



correspondiente, en forma que quede la corriente  $I$  repartida entre los watímetros  $W$  de las demás, y que se conserva un funcionamiento correcto (véase Apartado 265). La abertura automática del contacto  $d$  puede conseguirse por medio de un contacto auxiliar del interruptor de la máquina.

263. *Regulador secundario único con mando rápido.*—Siguiendo los principios indicados sobre regulador único y sistemas de mando (Apartados 255 y 231), se expone a continuación un sistema detallado en un informe presentado en la conferencia internacional de grandes redes en París de 1935.

Un regulador de frecuencia astático (construcción «Brown Boveri») tiene un sector móvil para cada máquina (fig. 17). Cada máquina está equipada con un regulador de potencia que acciona directamente el servomotor de la turbina, para lo cual tiene tres devanados; uno, voltímetros,  $a$ , y dos  $\varphi$  amperimétricos,  $b$  y  $c$ , recorridos por corrientes opuestas; el  $b$  es re-

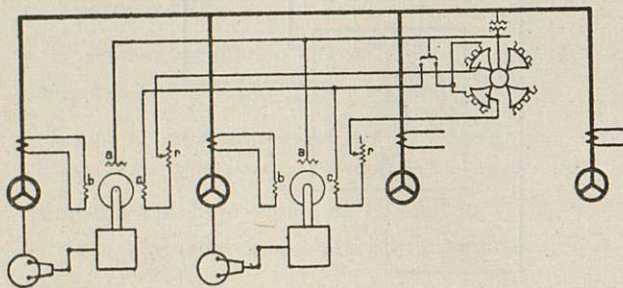


Fig. 17

corrido por la corriente de la máquina y el  $c$  es el devanado de mando, recorrido por una corriente opuesta a la de la máquina, pero regulada por el reóstato del regulador de frecuencia.

Los reostatos  $r$  sirven para ajustar a mano la repartición de carga entre las máquinas.

Este sistema tiene la desventaja de exigir una modificación en los dispositivos de los reguladores primarios.

264. *Regulador secundario único con mando lento.* En las redes eléctricas de París se emplea un regulador secundario único con telemando por impulsos a todas las centrales encargadas de la regulación. La misma idea puede aplicarse para regular una sola central, con la ventaja de no exigir los sistemas de telemando y teledida.

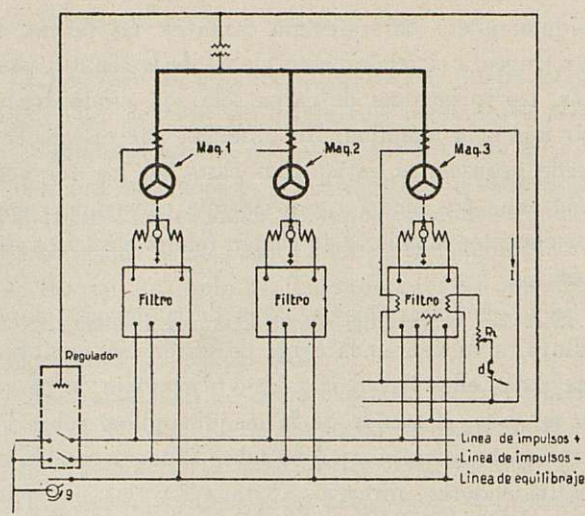


Fig. 18

Un regulador de frecuencia astático o con muy poco estatismo envía impulsos igualmente espaciados y de duración proporcional a su desviación. El regulador y sistema de impulsos puede ser, por ejemplo, como se indica en el Apartado 233. Si se tratara de una central que alimentase relojes eléctricos sincrónicos, el regulador debería ser, precisamente, de desviación horaria (Apartado 233).

Estos impulsos se envían por dos conductores distintos, según el sentido del desvío del regulador, a los motorcitos de compensación de todos los reguladores primarios (fig. 18); pero antes de llegar a ellos, cada máquina se encarga de filtrar los impulsos que recibe, en forma que interrumpe aquellos que provocarían una variación de carga en la máquina contraria a una correcta repartición.

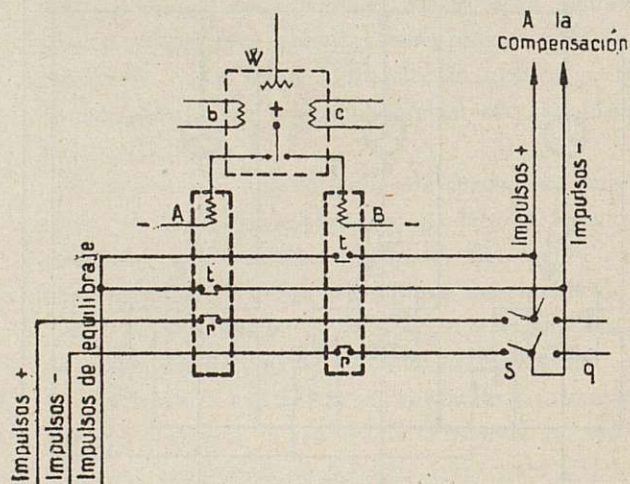


Fig. 19



Para precisar mejor, designaremos por impulsos (+) a los destinados a aumentar la potencia y por impulsos (—) a los destinados a disminuirla.

El filtro de cada máquina contiene un «relé» watimétrico diferencial (véase Apartado 265), para medir la desviación de potencia de la máquina. Este «relé» watimétrico se alimenta como se detalla en la máquina 3 (fig. 18) y en el Apartado 265.

La figura 19 representa el esquema de uno de los filtros. Si la desviación de potencia  $\Delta P_i$  de la máquina es nula, el watímetro diferencial W (fig. 19) está en equilibrio y el filtro no actúa y deja pasar todos los impulsos que vengan del regulador (fig. 18 y 19).

Si la máquina tiene una desviación de potencia  $\Delta P_i$ , el watímetro diferencial W cierra uno de sus contactos que conocta uno de los «relés» de filtraje de tipo telefónico A o B. Cada uno de estos «relés» tiene un contacto de reposo, *r* y otro de trabajo, *t*. Atendiendo ahora sólo a los contactos de reposo *r* (fig. 19), se ve claramente que: si la potencia de la máquina es demasiado alta, trabaja el «relé» A y su contacto *r* interrumpe los impulsos que envía el regulador en el sentido de aumentar, y si la potencia es demasiado baja, lo hace el «relé» B, con los impulsos de disminuir. De esta forma, cada variación de frecuencia será regulada sólo por aquellas máquinas que, al hacerlo, regulan, al propio tiempo, la potencia.

Durante los lapsos en los que no haya variaciones en la frecuencia, y en los que, por lo tanto, no funcione el regulador, las cargas entre las máquinas podrían quedar desequilibradas. Esto se evita con unos impulsos de equilibrado obtenidos con un emisor, que puede ser una ruedecita *g* con algunos dientes (fig. 18) que gire a velocidad constante y que toque un contacto. Estos impulsos pasan a través del contacto de trabajo *t* del «relé» A o B (fig. 19), según que la potencia de la máquina sea alta o baja y van a parar a la compensación en el sentido de equilibrar la carga.

En el funcionamiento exacto de este sistema, la suma de las desviaciones de potencia de cada máquina  $\Delta P_i$  debe ser nula, es decir:

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_i = 0 \quad (56)$$

los valores  $\Delta P_i$  no pueden ser todos del mismo signo. Sin embargo, debido a la inevitable falta de exactitud, puede darse el caso que, precisamente, lo sean. Enton-

ces, la central podría quedar sin regulación por quedar interrumpidos todos los impulsos (+) o (—) que vienen del regulador.

Para evitarlo, se añade a los «relés» de filtraje A y B (fig. 20) otro contacto de reposo, y se envían las

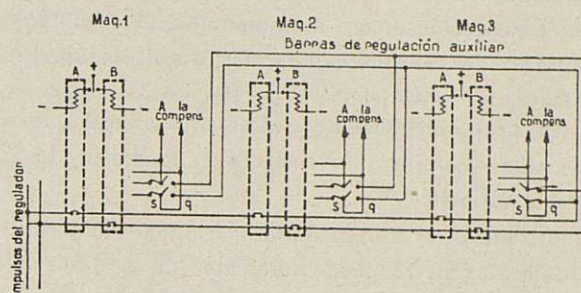


Fig. 20

dos clases de impulsos del regulador a través de estos contactos en serie. Estos impulsos van a parar a dos barras de regulación auxiliar.

La manera de operar es la siguiente: En una de las máquinas, por ejemplo, la 3 (fig. 20), se toman los impulsos de estas barras de regulación auxiliar, pasando el conmutador de la posición *s* a la *q* (fig. 20), y desconectando, además, los «relés» A y B. Así, en caso de que las máquinas restantes queden desviadas en el mismo sentido, los impulsos del regulador tienen paso a través de todos los contactos en serie y las barras de regulación auxiliar, hasta llegar a la compensación de la máquina 3.

Los watímetros diferenciales deben medir en todo momento la desviación de potencia  $\Delta P_i$  de cada máquina, aun cuando haya máquinas desconectadas. Véase en el Apartado siguiente cómo puede conseguirse fácilmente.

265. «Relés» watimétricos diferenciales.—Los «relés» watimétricos diferenciales W (figs. 15 y 19) a que se refieren los apartados 262 y 264 deben medir, en todo momento, la desviación de potencia  $\Delta P_i$  de cada máquina. Esto se puede conseguir fácilmente procurando que los transformadores de corriente de todas las máquinas sean de la misma relación, y ajustando las resistencias  $R_i$  (fig. 15) inversamente proporcional a la potencia de plena carga de cada máquina. De este modo, la corriente *I* se reparte a cada watímetro W proporcionalmente a la potencia de plena carga de las máquinas y se consigue así que las corrientes activas



de los devanados del «relé» watimétrico sean proporcionales a las potencia  $P_i$  y  $P'_i$ , midiendo, por lo tanto,  $\Delta P_i = P_i - P'_i$ .

Cuando la máquina hace el porcentaje de carga que le corresponde  $P_i = P'_i$  y  $\Delta P_i = 0$ , estando el «relé» watimétrico diferencial en equilibrio.

Al desconectar una o más máquinas, los contactos auxiliares de sus interruptores provocan la abertura de los contactos  $d$  (figs. 15 y 18), y la corriente se reparte proporcionalmente a las máquinas que quedan conectadas, continuando correcta la medición de los «relés» watimétricos.

Para descargar una máquina con objeto de permitir su desconexión, se puede intercalar un reóstato adicional en serie con  $R_i$  y aumentar su resistencia a partir del cero hasta que la carga se haya prácticamente anulado. Para poner la máquina en servicio, una vez sincronizada, se efectúa la operación inversa.

Estos reóstatos adicionales pueden permitir, además, que una máquina tome a voluntad un porcentaje de carga inferior que las demás. Otros reostatos adicionales, «shuntando» las  $R_i$ , permitirán aumentar a voluntad el porcentaje de carga de una máquina sobre las demás.

## 27.—CASO DE VARIAS CENTRALES EN PARALELO

En este caso admitimos que no hay necesidad de regular la potencia que transmiten las líneas; por esto, en su exposición trataremos solamente de la regulación de la frecuencia y potencia en las centrales. Cuando se trate, además, de regular las potencias transmitidas por algunas líneas, es debido, generalmente, a la existencia de interconexiones (Apartado 28).

En el caso de varias centrales en paralelo, deberán equiparse todas las máquinas con reguladores primarios estáticos ajustados al mismo estatismo  $\delta_i$  expresado en el sistema de tanto por uno (Apartado 24). De esta forma toda variación en la carga queda repartida entre todas las máquinas de la red, proporcionalmente a la potencia de plena carga.

En las grandes redes urbanas, a excepción de los cuatro instantes de la jornada que coinciden con la puesta en marcha y paro de las industrias, las variaciones de carga relativas son muy pequeñas. Supongamos que llegasen al 10 %; ajustando el estatismo al 4 %, resulta una variación en la frecuencia de 0,4 %,

o sea, de 0,2 periodos/seg. (con frecuencia normal de 50 periodos/segundo).

En general, aunque se trate de una gran red, es muy suficiente una regulación primaria en la forma indicada. Para conseguir una buena organización en la misma, el personal encargado de la explotación («load dispatching» o «repartiteur») prepara un programa de cargas de cada central, de acuerdo con el mejor rendimiento y con la previsión de la demanda. Entonces, los operadores de todas las centrales, a excepción de una, compensan manualmente los reguladores primarios para mantener la potencia constante e igual al programa. Así, en las variaciones de carga, después de haber actuado la regulación primaria, quedarán suministradas por la central que se ha exceptuado. El operador de ésta, deberá compensar manualmente los reguladores sólo cuando haya variación apreciable en la frecuencia, lo que ocurrirá, generalmente, sólo en los cuatro instantes críticos de la jornada.

Sólo en los casos especiales de alimentar relojes eléctricos sincrónicos o de ser conveniente regular la carga en líneas de interconexión a valores contractuales, será necesaria la regulación secundaria. Este último caso se tratará en el Apartado 28.

En el caso de ser precisa la regulación secundaria, la estudiaremos primeramente substituyendo cada central por una máquina equivalente de potencia igual a la total de la central; así, un sistema de  $n$  centrales, en principio, será como una central de  $n$  máquinas, y las ideas del Apartado 26 son aplicables a este caso.

271. *Regulación astática de una de las centrales.*—Considerando cada central como una máquina equivalente, podemos aplicar el método de regulación astática (Apartado 253) a una de las centrales. Entonces, esta central (denominada por los franceses «Chef d'orchestré») queda encargada de regular la frecuencia.

Si esta central (central-piloto) regula la frecuencia con mando rápido, tomará toda la variación de la carga en seguida y la potencia de las demás centrales no sufrirá variación apreciable. En cambio, si es de mando lento, al principio se repartirá el incremento de carga entre todas las centrales, hasta que empiece el efecto de la regulación secundaria, y, en ese momento, las otras centrales tomarán potencia por efecto de su estatismo primario (Apartado 263).

Por esto, no es necesario el empleo de reguladores de potencia (Apartado 234); precisamente éstos po-



drían provocar oscilaciones en la repartición de carga durante la regulación. Esto se comprende, desde el momento que, al variar la potencia de estas centrales, al empezar el cambio de régimen, actuarían los reguladores de potencia desplazando las características de los reguladores primarios y, una vez restablecida la frecuencia, deberían volver a actuar para desplazarlas en sentido contrario.

272. *Regulación con algunas de las centrales.*—En muchos casos, alguna de las centrales en paralelo son de gran importancia, y las otras, relativamente pequeñas. Entonces, si precisa la regulación secundaria, puede disponerse en forma que solamente afecte a las centrales importantes, dejando las de poca importancia con sus reguladores primarios.

El sistema de regulación secundaria que hay que emplear para las centrales importantes se expondrá en los Apartados siguientes (de 273 a 275). Para las centrales que quedan sólo con su regulación primaria, por el hecho de recibir de las otras una frecuencia prácticamente constante, su potencia también lo será.

273. *Regulación con estatismo virtual.*—El principio del estatismo virtual utilizado en el caso de una sola central (Apartado 262) puede aplicarse también en el caso de varias centrales en paralelo, considerando cada central como una sola máquina.

Entonces, cada central debe tener un regulador de frecuencia estático, que podrá compensar simultáneamente todas las máquinas de la central. En forma similar en el caso del Apartado 262, el estatismo del regulador secundario debe referirse a la desviación de potencia de la central y debe ser regulado por un «relé» diferencial, que compare la potencia de la central con la total de la red.

Esto exige que cada central tenga la medida de la carga total de la red, por medio de sistemas de telemetria. Como en los sistemas de telemetria, el aparato recibe la magnitud que se ha de medir en forma de corriente continua, el «relé» watimétrico diferencial W (fig. 15), debe comparar corrientes continuas.

Como cada regulador secundario sólo debe tener mando en su propia central, no harán falta sistemas de telemando.

El mando de cada regulador secundario sobre su propia central puede ser como el caso del Apartado 264.

274. *Regulación estática de cada central.*—El método del estatismo virtual tiene el inconveniente de exigir la telemetria de la potencia del conjunto en cada central. Si se quiere prescindir de ello, puede hacerse a costa de cambiar la regulación completamente estática por una regulación estática individual de cada central, considerada como una unidad (Apartado 252).

Empleando para ello reguladores de precisión de muy poca insensibilidad, puede permitirse un estatismo muy pequeño (fórmula 35); en general, es suficiente del 0,5 %.

275. *Regulador secundario único.*—Tratándose de varias centrales en paralelo, este sistema exige telemetrias y telemandos entre el regulador y las centrales.

Cada central puede considerarse substituida por una sola unidad, que recibe el mando en forma de impulsos del regulador secundario y los distribuye a todos los grupos que forman la central, a través de filtros adecuados, como, por ejemplo, los citados en el Apartado 264 (figs. 18 y 19).

El sistema de regulador único con mando lento descrito someramente para el caso de una sola central (Apartado 264), es, precisamente, el empleado en la regulación de las centrales en paralelo de la región de París. La idea ya se ha expuesto; hasta ahora, cambiar cada máquina por una central, en la forma siguiente:

El regulador secundario puede instalarse en la oficina de Explotación («load dispatching»), junto con sus «relés». Cada central que precisa regular está representada, en esencia, por un «relé» diferencial para medir la desviación de potencia y los «relés» tipo telefónico para filtrar los impulsos que se envían a la central, por telemando. El «relé» diferencial recibe por telemetria la potencia que hace la central y la que debería hacer, convertidas en corrientes continuas.

## 28.—CASO DE INTERCONEXIONES

Entendemos por interconexiones las uniones que se establecen entre redes administradas independientemente, con objeto de efectuar un intercambio de energía entre unas y otras, obedeciendo a un programa predeterminado.

El problema de regulación de la frecuencia y potencia en las redes interconectadas viene agravado por



la regulación de las interconexiones. En las redes pertenecientes a una sola empresa, en general, basta regular la repartición de la potencia entre las centrales; pero, si, por cualquier motivo, fuese preciso regular también la de alguna línea, ésta puede considerarse como línea de interconexión entre dos redes parciales y tratar el caso como interconexiones.

En la práctica, la principal aplicación de la regulación secundaria está, precisamente, en las redes interconectadas. En términos generales, puede decirse que sólo en estos casos, y cuando se alimenten relojes eléctricos sincrónicos, es necesaria dicha regulación.

En lo que al estudio de la regulación de frecuencia y potencia se refiere, puede simplificarse el caso, suponiendo substituida la red de centrales de cada empresa por una central única equivalente que posea una red propia, cuya carga sea la demanda de los abonados de la empresa correspondiente. Las líneas que interconectan estas centrales ficticias forman la red de interconexión. Debe tenerse presente en la aplicación de cualquier método de regulación, que estas centrales ficticias sustituyen a varias en paralelo. Para más claridad, podemos considerar que el emplazamiento de estas centrales ficticias es, precisamente, el mismo que en las centrales de donde parten las líneas de interconexión.

El principal objeto de la red de interconexión es poder intercambiar bloques de energía entre las distintas empresas. Esto exige un programa de las potencias que hay que conjugar, de acuerdo con la capacidad de transporte de las líneas. La distribución de estas potencias en la red de interconexión será obpeto del Capítulo III. Ahora nos ocuparemos solamente de la regulación de las que debe suministrar cada empresa.

Sea un caso general de  $n$  empresas interconectadas por una red, representada simbólicamente por un círculo (fig. 21); despreciando las pérdidas propia de esta red, la suma de todas las potencias suministradas a la misma por las  $n$  empresas debe ser nula en todo momento, esto es:

$$\sum_{i=1}^n P_{si} = 0 \quad (57)$$

Una buena regulación debe consistir en mantener los valores de  $P_{si}$  constantemente iguales a los previstos  $P'_{si}$  por el programa establecido. Toda perturba-

ción provocará una desviación en las potencias de interconexión

$$\Delta P_{si} = P_{si} - P'_{si} \quad (58)$$

cumpléndose, además (recordando la 57)

$$\sum_{i=1}^n P'_{si} = 0 \quad (59)$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_{si} = 0 \quad (60)$$

En la práctica, el valor de  $P'_{si}$  correspondiente a una empresa, viene fijado por el balance entre las potencias que debe suministrar a algunas de las otras empresas y las que debe recibir de las restantes.

Cuando en la central concurren varias líneas de interconexión, el valor de  $P_{si}$  es la suma de las potencias

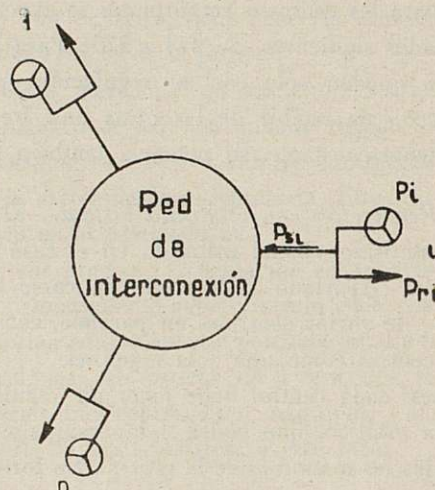


Fig. 21

que salen por todas ellas, y la regulación debe efectuarse de acuerdo con los valores de esta suma, y no con la potencia de una de estas líneas.

Si todas la máquinas están equipadas solamente con reguladores primarios, al presentarse un incremento en la carga, en cualquiera de las empresas, aquél se reparte en todas las máquinas en paralelo, de acuerdo con los estatismos primarios, lo que da lugar a una variación en las potencias interconectadas. Para una nueva compensación de estas potencias, es precisa la regulación secundaria, encaminada a que las centrales de cada red tomen, en definitiva, las variaciones de cargas propias sin intervención en las variaciones de carga externas. Esto se consigue a base de los mé-



todos ya expuestos (Apartado 25) con ciertas variaciones o ampliaciones.

Para estudiar esta regulación secundaria, observemos que en toda perturbación debe cumplirse la ecuación (60), la que sustituye a la (36) de los métodos generales. Para que queden determinados los  $n$  valores de  $\Delta P_{si}$  y el de la frecuencia  $f$  harán falta  $n$  ecuaciones más, que deben obtenerse de los  $n$  reguladores de las  $n$  centrales ficticias o empresas.

281. *Regulación astática de la frecuencia en una de las redes y de la potencia de interconexión de las demás.* Una de las redes denominada red-piloto, se encarga de regular la frecuencia según una característica astática, aplicando cualquiera de los métodos citados y sin ninguna ligazón con las demás redes. Esto establece la ecuación:

$$f = f_0 \quad (61)$$

Las  $n - 1$  redes restantes, por medio de reguladores de potencia adecuados, mantienen constante la potencia  $P_{si}$  que suministran a la red de interconexión, estableciendo las  $n - 1$  ecuaciones restantes:

$$\Delta P_{si} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (62)$$

La desviación  $\Delta P_{sn}$  correspondiente a la red piloto también resulta nula, en virtud de la ecuación (60).

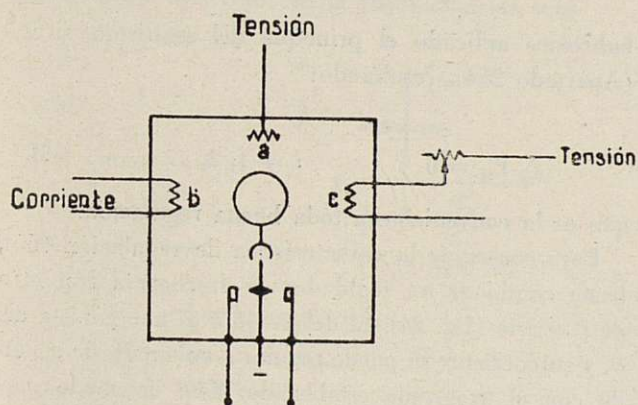


Fig. 22

Así, la red-piloto deberá resolver el problema de la regulación astática de su frecuencia (Apartado 27), y las redes restantes instalarían reguladores de potencia en la central de unión con la red de interconexión. Estos reguladores podrían estar formados por «relés» wattimétricos diferenciales (fig. 22), en los que la

corriente del devanado,  $c$ , puede ajustarse de acuerdo con el programa establecido, o bien, transformando la medida de la potencia en corriente continua y empleando un «relé» diferencial basado en el principio del galvanómetro de bobina móvil (fig. 23). Este «relé» debería tener mando sobre la compensación de todas

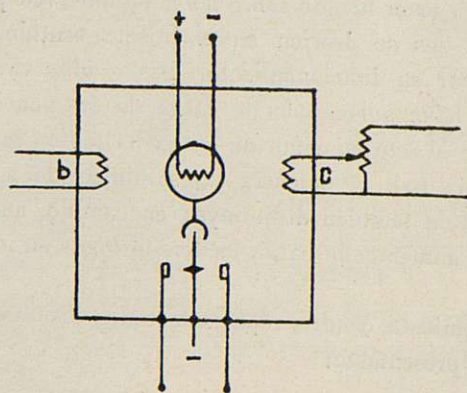


Fig. 23

las máquinas de la central; en caso de desearlo, se podría hacer intervenir en la regulación de las centrales de la red que se quisiera, mediante sistemas de telemando.

Si la central de interconexión no fuese adecuada para regular la potencia  $P_{si}$ , por telemedida se podría transportar esta potencia a la central conveniente para su regulación.

Por ser la regulación astática, todo incremento de carga será, en definitiva, tomado por la red-piloto, quedando la frecuencia invariable. Si la variación de la demanda ha tenido, precisamente, lugar sólo en esta red, la potencia  $P_{si}$  en las interconexiones será la misma de antes; en cambio, si ha tenido lugar en otra de las redes, la potencia  $P_{si}$  de interconexión, varía en esta otra red y actuará su regulador de potencia. Pero hay que tener en cuenta, que, al empezar el cambio de régimen y actuar los reguladores primarios estáticos, la carga se reparte en todas las máquinas en paralelo y varía la carga de todas las interconexiones, funcionando todos los reguladores de potencia, incluso los de las redes que no tienen variación de demanda. Esto provoca oscilaciones en la potencia de las interconexiones.

Por lo anteriormente expuesto, este sistema debe emplearse substituyendo los reguladores de potencia por otros combinados de frecuencia y potencia para que



sólo actúen cuando haya variación en la carga de su propia red. Este método es el siguiente:

282. *Regulación discontinua de la frecuencia y potencia.*—Este método es una modificación del anterior, instalando, junto con cada regulador de potencia, otro de frecuencia, con los contactos en serie, en forma que, para tener mando sobre las máquinas, sea preciso que los dos se desvíen en el mismo sentido. Para compensar su funcionamiento, basta observar que, cuando haya aumentado de carga, la frecuencia disminuye; si este aumento de carga ha tenido lugar en la propia red, la potencia  $P_{si}$  suministrada a la interconexión también disminuye; en cambio, aumentará si el aumento de carga ha tenido lugar en una red ajena.

El siguiente cuadro representa todos los casos que pueden presentarse:

Red que cambia la carga	Variación de carga	Variación frecuencia	Variación potencia interconexión	Regulador actúa
Propia . . .	aumenta	$-\Delta f$	$-\Delta P_{si}$	Sí
	disminuye	$+\Delta f$	$+\Delta P_{si}$	Sí
Ajena. . . . .	aumenta	$-\Delta f$	$+\Delta P_{si}$	No
	disminuye	$+\Delta f$	$-\Delta P_{si}$	No

Se ve claramente que sólo actúa el regulador de la red propia y el de frecuencia de la red-piloto.

En este método, es conveniente tolerar un pequeño estatismo (0,5 %) en el regulador de frecuencia de la red-piloto, referido a la carga de las máquinas. Esto proporciona una pequeña desviación de la frecuencia que asegura el funcionamiento del regulador de potencia-frecuencia de la red del cambio de carga.

Este método presenta todavía el inconveniente de actuar indebidamente los reguladores de potencia-frecuencia cuando haya variaciones de carga simultáneas en varias redes. Para comprenderlo, basta observar que en tal caso pueden dejar de cumplirse los signos de  $\Delta P_{si}$  indicados en el cuadro anterior.

283. *Regulación astática de una red y estática de las demás.*—La red-piloto se encarga de regular la frecuencia según una característica astática (como en el Apartado 281), aplicando uno de los métodos citados; lo que establece

$$f = f_0 \quad (63)$$

Las  $n - 1$  redes restantes combinan la regulación de la frecuencia y potencia que suministran a la red de interconexión, por medio de un regulador estático, obedeciendo a las  $n - 1$  ecuaciones:

$$f = f_0 + \delta_i \Delta P_{si} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (64)$$

Estas ecuaciones (63 y 64), junto con la (60), además de fijar el valor de  $f$ , determinan

$$\Delta P_{si} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (65)$$

que es lo deseado.

Se obtiene el mismo resultado con regulación estática de todas las redes, refiriendo el estatismo a las potencias interconectadas  $P_{si}$  (Apartado 284)

Este método, igual que los anteriores (Apartados 281 y 282), tiene el inconveniente de que todos los incrementos de carga del conjunto de todas las redes son tomados transitoriamente sólo por la red-piloto, lo que reduce mucho la flexibilidad.

284. *Regulación individual de cada red con estatismo virtual y mando lento.*—Recordaremos que el principio del estatismo virtual (Apartado 254) se base en la ecuación (50) y que ésta se cumple siempre entre las potencias suministradas a la red de interconexión (ecuación 60); si regulamos la frecuencia de cada red individualmente según la característica.

$$f = f_0 + \delta_i \Delta P_{si} = 0 \quad (66)$$

habremos aplicado el principio del estatismo virtual (Apartado 254), resultando:

$$f = f_0 \quad (67)$$

$$\Delta P_{si} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (68)$$

que es lo conveniente a toda buena regulación.

Para conseguir la característica de regulación (66), basta combinar un regulador de frecuencia con otro de potencia (fig. 24). El devanado  $c$  es antagonista del  $b$ , y su corriente se puede regular a voluntad, de acuerdo con el programa establecido. Este devanado puede substituirse por la regulación del resorte antagonista  $t$ .

En caso de poseer la medida de la potencia de interconexión  $P_{si}$  en forma de corriente continua, el regulador de potencia queda reducido a un simple «relé» diferencial (fig. 25). El devanado  $c$  sirve también para ajustar el valor de  $P_{si}$ , y puede substituirse igualmente por la regulación del resorte antagonista  $t$ .



Si la central donde se instala este regulador no coincide con el punto de interconexión, puede trasladarse el valor de la potencia de esta interconexión por un sistema de teledirigida.

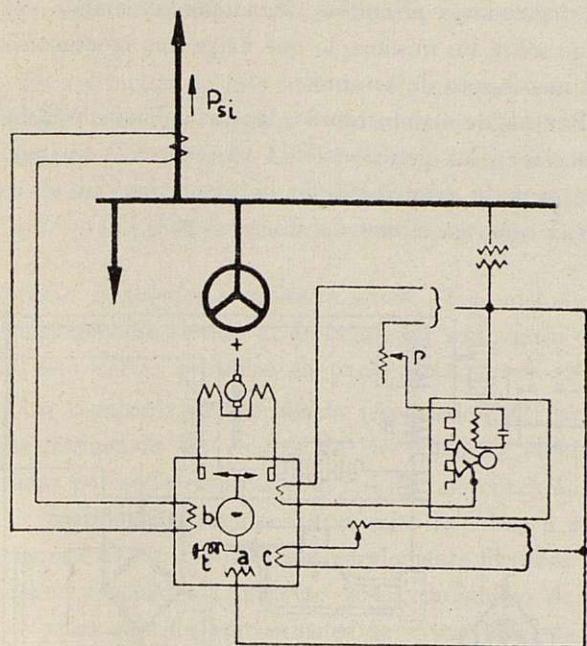


Fig. 24

El mando en forma de impulsos actúa sobre la compensación de cada máquina simultáneamente. Cada empresa puede hacer intervenir en la regulación las cen-

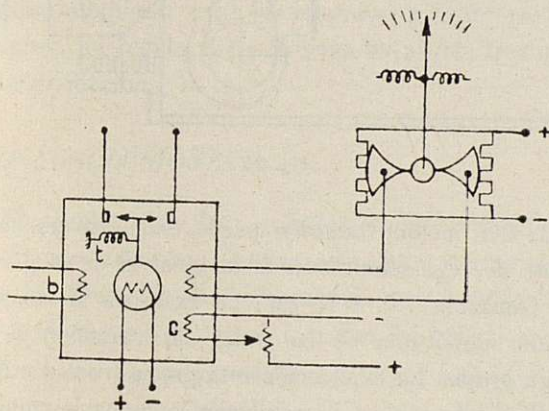


Fig. 25

trales que juzgue conveniente, afectándolas de estos impulsos por sistemas de teledirigida.

Este método, por ser de mando por impulsos, es de fácil adaptación a los reguladores primarios normales.

Pasemos ahora a estudiar las condiciones necesarias para que sólo resulten compensadas por la regulación secundaria aquellas redes que tengan variación en la demanda.

Para más comodidad, en la ecuación (66) consideraremos el valor inverso del estadismo  $\delta_i$ , escribiendo

$$K_i (f - f_o) + \Delta P_{si} = 0 \quad (69)$$

en la que

$$K_i = \frac{1}{\delta_i} \quad (70)$$

M. Darrieus propuso llamar  $K_i$  «*énergie réglante*» (Conferencia Internacional de París, de 1939); les denominaremos «*coeficiente de regulación*».

Designando ahora por  $K_{pi}$  al coeficiente de regulación primaria de cada red, se tienen las  $n$  características primarias.

$$K_{pi} (f - f_o) + \Delta P_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (71)$$

que, sumada miembro a miembro, dan la característica de una máquina equivalente al conjunto de todas las redes interconectadas.

$$K_p (f - f_o) + \Delta P = 0 \quad (72)$$

en la que

$$K_p = \sum_{i=1}^n K_{pi} \quad (73)$$

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (74)$$

Al presentarse un incremento de carga  $\Delta P_{ri}$  en cada red, el conjunto sufre el incremento

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_{ri} \quad (75)$$

que, debido a la regulación primaria, se reparte entre las empresas según los valores de  $\Delta P_i$ , obedeciendo a las (71), lo que provoca la desviación de las potencias interconectadas

$$\Delta P_{si} = \Delta P_i - \Delta P_{ri} \quad (76)$$

y el regulador secundario de cada red  $i$  sufre la desviación.

$$\epsilon_{si} = K_i (f - f_o) + \Delta P_{si} \quad (77)$$

resultando de las (71), (76) y (77)

$$\epsilon_{si} = (K_i - K_{pi}) (f - f_o) - \Delta P_{ri} \quad (78)$$

Para que esta desviación dependa solamente del in-



cremento de carga  $\Delta P_{ri}$  de la propia red, excluyendo las variaciones de la frecuencia, es preciso que

$$K_i = K_{pi} \quad (79)$$

Luego, si cada red da a su regulador secundario el mismo coeficiente que su regulación primaria, sólo actúan los reguladores secundarios de las redes que tengan variación en la demanda, y permanecen inmóviles las compensaciones de las otras redes. Este es el método propuesto por M. Darrieus.

Pero, la condición (79) se ha deducido suponiendo que los reguladores primarios están en equilibrio (71), lo que no se cumple en los primeros momentos de la perturbación. Entonces, la regulación primaria de la red  $i$  considerada tendrá la desviación

$$\varepsilon_{pi} = K_{pi} (f - f_o) + \Delta P_{ri} \quad (80)$$

Mientras la regulación primaria no haya terminado su actuación, esta ecuación (80) sustituye a la (71), y en lugar de la (78), se obtiene la siguiente:

$$\varepsilon_{si} = (K_i - K_{pi}) (f - f_o) + \varepsilon_{pi} - \Delta P_{ri} \quad (81)$$

Como se hace  $K_i = K_{pi}$ , esta ecuación (81) se reduce a

$$\varepsilon_{si} = \varepsilon_{pi} - \Delta P_{ri} \quad (82)$$

Lo que nos dice: que durante el período de regulación primaria los reguladores secundarios de las redes que no ha variado su demanda tienen una desviación que desaparece con el equilibrio del regulador primario. Esto justifica la conveniencia de que el regulador secundario sea de mando lento, con objeto de no dar impulsos inoportunos.

Así, al presentarse un cambio de régimen, el incremento de carga es repartido, al principio, entre todas las redes y al actuar la regulación secundaria, las redes que han tenido variación en la demanda entran en compensación y van tomando el incremento que habían experimentado las demás.

Este método tiene la ventaja de que todo incremento de carga es tomado transitoriamente por todas las redes, lo que da gran flexibilidad.

Por ser de mando lento tiene la desventaja de dejar variaciones apreciables en la frecuencia durante los cambios de régimen; en cambio, presenta una gran estabilidad en la regulación.

285. *Regulación individual de cada red con estabilidad virtual y mando rápido.*—Los mismos princi-

pios y ecuaciones del método anterior pueden aplicarse ahora. La diferencia esencial consiste en el mando.

En lugar de los impulsos sobre la compensación de los reguladores primarios, se adopta un mando continuo sobre los mismos, lo que exige una modificación del mecanismo de retorno.

Por ser de mando rápido, las variaciones de la frecuencia en las perturbaciones se reducen a un mínimo, pero la estabilidad de la regulación no es tan buena como en el método anterior (284).

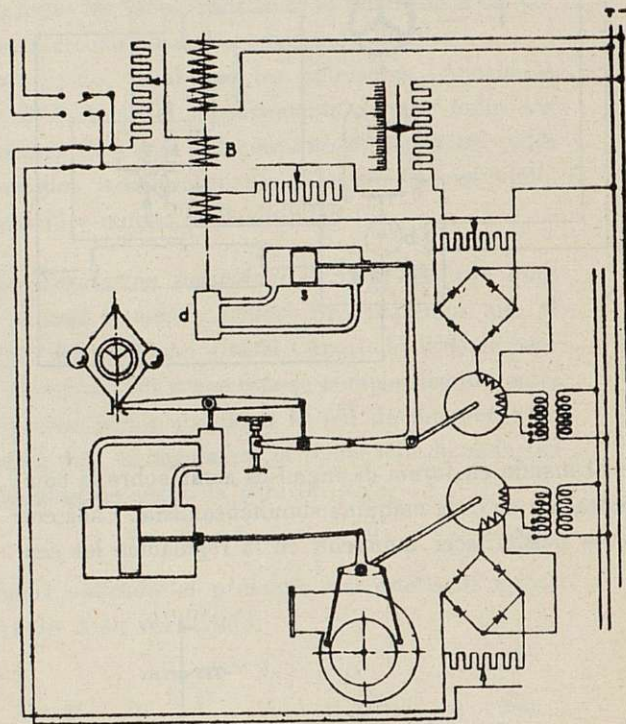


Fig. 26

En este método también puede escogerse un coeficiente de regulación secundaria igual al de la primaria (ecuación 79), pero esto no excluiría la compensación inoportuna de las redes sin variación en su carga propia. La explicación está precisamente en que, en el mando rápido, la regulación secundaria empieza simultáneamente con la primaria, y la condición (79) no logra su objeto hasta que los reguladores primarios no estén en equilibrio.

Las casas Charmilles y Brown Boveri, en colaboración, construyen reguladores de este tipo, cuyo esquema se presenta en la figura 26. En esencia, el regulador secundario es uno de potencia que, midiendo la



desviación de la potencia de interconexión actúa sobre una válvula adicional *d*. Esta válvula acciona un servomotor adicional *s* que da el estatismo al regulador primario de velocidad. El estatismo primario se consigue eléctricamente con la bobina *B*, que actúa sobre la válvula *d*.

La aplicación de este método sólo es prácticamente factible cuando se regula la potencia de las interconexiones por una sola central en cada red, ya que el regulador es demasiado complicado para transmitir en forma práctica su mando a las demás centrales.

286. *Regulador secundario único*.—Este método es completamente similar al de regulador secundario único para varias centrales en paralelo (Apartado 275).

Un regulador de frecuencia (Apartado 232) recibe por telemedida los valores de las potencias suministradas por cada empresa a la red de interconexión, y, por medio de telemandos, transmite impulsos a cada empresa. Estos impulsos son previamente filtrados por «relés» adecuados (Apartado 264), con objeto de dejar pasar sólo los convenientes para una correcta regulación.

Cada empresa puede, a su vez, retransmitir por su cuenta los impulsos que recibe a las centrales cuya carga convenga corregir, mediante un nuevo filtraje de estos impulsos.

Este método tiene la desventaja de la ligazón que precisa establecer entre las empresas y la de que cada empresa no regula por su cuenta su propia frecuencia e interconexión.

## 26.—CONCLUSIONES.

El problema de la regulación de las potencias de varias centrales en paralelo está íntimamente ligado con la regulación de la frecuencia y es independiente de la estructura de la red que una las centrales.

En todos los casos, deben equiparse todas las máquinas con reguladores de velocidad (reguladores primarios) con característica estática. Estos reguladores tienen, por lo menos, el doble objeto de asegurar la regulación en caso de quedar la máquina desacoplada de las demás y en caso de fallo de los otros procedimientos de regulación. En general, estos reguladores son suficientes para una buena regulación.

Cuando se alimentan relojes eléctricos sincrónicos es

preciso, por lo menos, el empleo de un regulador de frecuencia horario.

En los casos de interconexiones en las que sea preciso regular las potencias interconectadas según valores prefijados, es necesaria la regulación secundaria. Si se trata de un caso sencillo y de redes con poca variabilidad de carga, a veces, se puede prescindir de ella; pero es a condición de una menor exigencia en la regulación.

En general, no es posible dar reglas concretas sobre cuándo deberá emplearse la regulación secundaria. Esto debe estudiarse en cada caso particular, teniendo en cuenta, desde luego, el factor económico.

Cuando sea aconsejable la regulación secundaria, las características de cada caso particular son los factores que podrán aconsejar sobre la elección del método que se haya de emplear.

Con la regulación secundaria se persiguen los dos puntos siguientes: Una frecuencia lo más constante posible, y una repartición equitativa de la potencia entre las redes para conservar las potencias interconectadas a los valores previstos.

En general, se consigue una buena regulación combinando en cada red la frecuencia con la potencia de interconexión, en forma que cada red interconectada participe en la regulación de la frecuencia. El mando por impulsos sobre la compensación es lento y, por lo tanto, las variaciones de la frecuencia durante una perturbación son más pronunciadas que con un mando continuo y rápido; pero, como contrapartida, presenta la ventaja de una mayor estabilidad.

## 3. RED DE ALIMENTACIÓN EN BUCLE

### 31.—RESOLUCIÓN DE LA RED EN BUCLE

Una red de alimentación en bucle cerrado está formada por una sola malla (fig. 27), que recoge la energía eléctrica generada por varias centrales para alimentar varias estaciones receptoras. En caso de que las centrales pertenecieran a empresas distintas, cada una con su red propia (fig. 28), tendríamos una red de interconexión en bucle cerrado. En el primer caso, forzosamente debe haber algún nudo con estación receptora; en cambio, en el segundo, como algunas de las centrales que poseen red propia pueden absorber carga de la red de interconexión, puede darse el caso



de que en todos los nudos haya central capaz de regular su carga.

Tanto en un caso como en otro, se entiende por resolución de la red determinar las corrientes y tensiones en todo el bucle, conociendo la tensión de un punto y las corrientes suministradas o absorbidas en todos sus nudos. Este problema es el mismo que el de la resolución de una malla de distribución, pero en nuestro caso los segmentos de la red son cuadripolos.

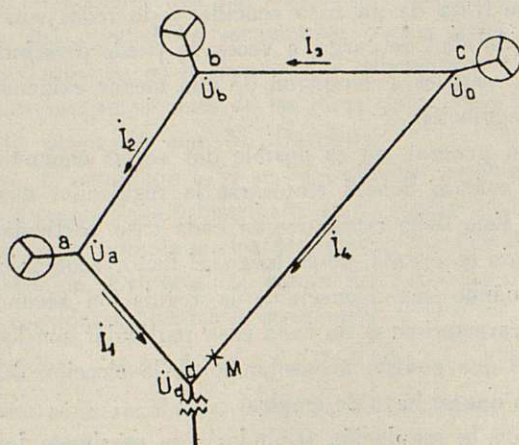


Fig. 27

nes en todo el bucle, conociendo la tensión de un punto y las corrientes suministradas o absorbidas en todos sus nudos. Este problema es el mismo que el de la resolución de una malla de distribución, pero en nuestro caso los segmentos de la red son cuadripolos.

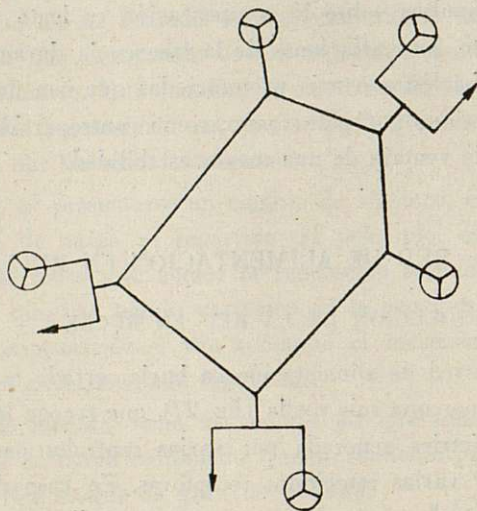


Fig. 28

311. *Caso de capacidades despreciables.*—Si la red no es demasiado extensa y la tensión no demasiado alta, para poder despreciar la capacidad electrostática, los segmentos de la red serán simples impedancias.

En tal caso pueden aplicarse las mismas fórmulas de una malla de distribución por corriente continua, pero cambiando las resistencias por impedancias y teniendo en cuenta que, tanto éstas como las corrientes y tensiones, son cantidades complejas.

Sin embargo, preferimos aplicar el método de superposición basado en la propiedad lineal de la ley de Ohm, en la forma expresada para el teorema de Thevenin. Para lo cual, basta abrir el bucle en un nudo cualquiera (por ejemplo, en M, fig. 27) y resolver la cadena resultante (fig. 29); así se obtiene una

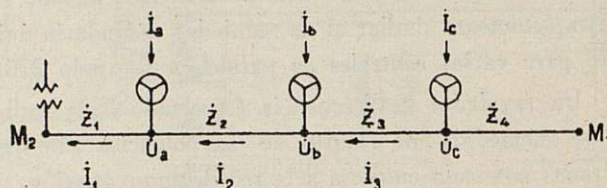


Fig. 29

tensión  $\dot{U}_m$  entre los extremos  $M_1$  y  $M_2$ . La corriente de circulación de  $M_2$  a  $M_1$  al aplicarles la tensión  $-\dot{U}_m$  es la corriente  $\dot{I}_4$  de la línea  $cd$ .

Para cerciorarse de la certeza de este procedimiento, basta considerar los dos estados siguientes de la red:

1.º La repartición de corrientes y tensiones en la cadena abierta con la tensión  $\dot{U}_m$  entre los extremos  $M_1$  y  $M_2$  (fig. 29).

2.º El estado de la misma cadena provocado solamente por la corriente de circulación al aplicar la tensión  $-\dot{U}_m$  entre sus extremos.

Al superponer estos dos estados, se obtiene otro de resultante con igual tensión en sus dos extremos y corriente  $\dot{I}_4$  en la línea  $cd$ ; este estado resultante nos da la distribución de corrientes y tensiones en el bucle.

En el ejemplo en cuestión se supone una sola estación receptora; en caso de haber más de una pueden aplicarse los mismos razonamientos y fórmulas, considerando que por el nudo correspondiente entre una corriente negativa.

La resolución del bucle una vez abierto (fig. 29) es como sigue:

$$\dot{U}_m = \dot{I}_1 \dot{Z}_1 + \dot{I}_2 \dot{Z}_2 + \dot{I}_3 \dot{Z}_3 = \sum_{i=1}^{s-1} \dot{I}_i \dot{Z}_i \quad (83)$$



siendo  $\dot{I}_1$  y  $\dot{Z}_1$  la corriente de impedancia de cada segmento. También puede expresarse:

$$\begin{aligned}\dot{U}_m &= (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \dot{Z}_1 + (\dot{I}_b + \dot{I}_c) \dot{Z}_2 + \dot{I}_c \dot{Z}_3 = \\ &= \dot{I}_a \dot{Z}_1 + \dot{I}_b (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) + \dot{I}_c (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3) \\ &= \dot{U}_m \sum \dot{I}_n \dot{Z}_n\end{aligned}\quad (84)$$

siendo  $\dot{I}_n$  la corriente que entra por cada nudo y  $\dot{Z}_n$  la impedancia desde el extremo  $M_2$  hasta el nudo correspondiente.

La corriente  $\dot{I}_4$  en el punto de abertura es:

$$\dot{I}_4 = \frac{-\dot{U}_m}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3 + \dot{Z}_4}$$

y en general:

$$\dot{I}_m = \frac{-\dot{U}_m}{\sum_{i=1}^s \dot{Z}_i}$$

Una vez determinada la corriente  $\dot{I}_m$  de un segmento, fácil es calcular la de los demás segmentos y la tensión en cada nudo.

En la práctica, en lugar de ser datos del problema las corrientes  $\dot{I}_a \dots \dot{I}_d$ , la acostumbra a ser sus potencias activas y reactivas. Lo que exige el cálculo previo de estas corrientes; pero, como las diferencias de tensiones entre los nudos, generalmente, no son despreciables, sobre todo, por su diferencia de fase, resulta problema de complicada resolución. Esto aconseja la resolución práctica por aproximaciones sucesivas en la forma siguiente:

Se calculan primeramente las corrientes  $\dot{I}_a \dots \dot{I}_d$  suponiendo igual tensión en toda la red, o bien, admitiendo a ojo unas caídas vectoriales de tensión. Después, se resuelve la red como se ha indicado, y si las tensiones que se encuentran resultan demasiado distintas de las supuestas, se corrigen éstas repitiendo el cálculo, y, así sucesivamente, hasta llegar a la aproximación deseada.

Por lo anteriormente expuesto, se comprende que, en la práctica, la resolución de un simple bucle puede resultar laboriosa, por exigir varios tanteos. Con el auxilio de una red en miniatura adecuada podría resolverse más cómodamente y tantas veces como convenga para cualquier estudio de regulación de cargas y voltajes.

312. *Caso de capacidades no despreciables.*—En este caso consideraremos las líneas como verdaderos cuadripolos y, por lo tanto, se podrán sustituir por un circuito equivalente en  $\pi$  (Apéndice I-f), resultando que cada segmento vendrá representado por el esquema de la figura 30, cuyas constantes  $\dot{Z}_e$ ,  $\dot{Y}_0$ ,  $\dot{Y}_1$  vendrán determinadas exactamente por las fórmulas (166)

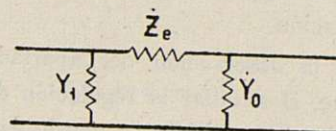


Fig 30

y (168), o bien con gran aproximación por las (171). Si las líneas no son muy largas (hasta unos 200 Kms.), no es preciso esta gran aproximación y pueden suponerse las características localizadas, dando lugar (según fórmulas 173 y 111 y 113):

$$\dot{Z}_e = \dot{Z} = (r + j\omega L) l \quad (86)$$

$$\dot{Y}_0 = \dot{Y}_1 = \frac{\dot{Y}}{2} = \frac{1}{2} j\omega C l \quad (87)$$

Las admitancias  $\dot{Y}_0$  e  $\dot{Y}_1$  coinciden con los nudos y absorben una corriente de capacidad o, lo que es lo mismo, suministran una potencia reactiva que podrá sumarse con la que genera la central conectada al nudo correspondiente. Esta potencia reactiva vale:

$$Q_0 = \frac{1}{2} \omega C l U_1^2 \quad (88)$$

Este caso queda, por lo tanto, reducido al estudiado anteriormente (311).

### 32.—REGULACIÓN DE LAS CARGAS EN LA RED

Según lo expuesto en el Apartado 122, en una red de alimentación en bucle cerrado no será posible regular las cargas de todas sus líneas por medio de la repartición de carga en las centrales.

Si se trata de una red de interconexión (fig. 28), en la que todos sus nudos están provistos de central capaz de regular, habrá una línea sin regulación o, lo que es lo mismo, las cargas de todas las líneas están supeditadas a una relación vectorial determinada por la segunda ley de Kirchhoff, aplicada en el bucle cerrado. Al abrir el bucle, en un punto cualquiera, quedan todas las líneas con regulación.



Si se trata de un bucle con estaciones receptoras (figura 27) y, por lo tanto, con nudos sin central, el número de líneas sin regulación será el de estaciones receptoras más uno, o bien, existirá una relación vectorial entre las cargas de las dos líneas que concurren a cada estación receptora más otra relación impuesta por la segunda ley de Kirchhoff en el bucle. Al abrir el bucle en un punto cualquiera habrá una línea más con regulación.

Recordando la observación del Apartado 122, se comprende que, al estudiar la regulación de la carga de alguna de las líneas del bucle, puede darse el caso de hallar valores negativos para las potencias de determinadas centrales; como en la práctica esto no es posible, al darse este caso nos encontraremos con un mayor número de líneas sin poder regular su carga por medio de las centrales.

Así, por ejemplo, en el bucle de la figura 27, la línea *ad* no podrá regularse a CERO amperios, porque exigiría que la central *a* funcionase como motor (potencia negativa). Esto se comprende, observando que la corriente suministrada por las centrales *b* y *c* va a parar a la estación *d*, repartiéndose por las dos líneas *ad* y *cd*.

321. *Inyección de f. e. m.*—Con la inyección de una f. e. m. regulable en el bucle, puede aumentarse en una unidad el número de líneas con regulación. De estar el bucle abierto, la inyección de la f. e. m. no varía el número de líneas con regulación.

El objeto de la red de alimentación es recoger la potencia generada por las centrales y alimentar las estaciones receptoras, y el de una red de interconexión es el de poder intercambiar bloques de energía entre las empresas interconectadas. En la práctica, tanto en un caso como en otro, los programas de cargas en las centrales no obedecen a una regulación de las que circulen por las líneas, sino, al contrario, se establecen de acuerdo con las reservas hidráulicas, caudales de los ríos, existencias de combustible o según el contrato entre las empresas interconectadas. Y de todo ello resultan las cargas que deben circular por las líneas. Claro está que, al preparar este programa, debe tenerse en cuenta la capacidad de transporte de las líneas, para que ninguna de ellas resulte sobrecargada.

Por cada régimen de cargas en las centrales se tiene un estado determinado de cargas que circulan por

las líneas (Apartados 311 y 312). Si el bucle está abierto, estos estados son invariables; pero con el bucle cerrado, pueden modificarse inyectando f. e. m. variables que pueden regular la carga de una línea cualquiera, pero sólo en una. En la práctica sería interesante poder regular la carga de esta línea en forma que las pérdidas en todo el bucle fuesen mínimas.

Supongamos se desee precisamente regular la carga de una de las líneas, por ejemplo, la *cd* (fig. 27). Es fácil calcular para cada régimen la f. e. m. que se ha de inyectar, por ejemplo, en el punto M, para que la corriente *cd* sea la deseada.

Basta imaginar abierto el bucle en el punto M (Apartado 311) y calcular por la fórmula (83) u (84) la tensión  $\dot{U}_m$  que aparece entre los extremos en que ha quedado abierto.

Al cerrar el bucle, sin inyectar f. e. m. alguna, la corriente en *cd* será  $\dot{Y}_m$  (fórmula 85). Si deseamos que ésta sea precisamente  $\dot{I}$  deberemos inyectar en el bucle una corriente de circulación  $\dot{I} \rightarrow I_m$  y, por lo tanto, una f. e. m.

$$\dot{E} = (\dot{I} - \dot{I}_m) \sum_1^s \dot{Z}_i \quad (89)$$

resultando (según fórmula 85):

$$\dot{E} = \dot{U}_m + \dot{I} \sum_1^s \dot{Z}_i \quad (90)$$

Para dimensionar los transformadores que deben inyectar esta f. e. m. variable, debe calcularse ésta para los distintos regímenes posibles.

Para obtener una completa regulación de la corriente  $\dot{I}$ , es preciso que la f. e. m.  $\dot{E}$  pueda variarse en magnitud y fase; esto se realiza inyectando dos componentes rectangulares de la misma, regulables sólo en magnitud (según los Apartados 325 y 326).

322. *Compensación de la caída de tensión de una línea.*—Generalmente, en la práctica, la inyección de f. e. m. tiene por objeto compensar la caída vectorial de tensión en las largas líneas. En los bucles de poca extensión, no resulta económico inyectar f. e. m., y, en general, se dejan las caídas de tensión sin ninguna compensación. Pero, en bucle formado por largas líneas (centenares de Kms.), las caídas vectoriales de tensión pueden llegar a ser muy elevadas y comprometer la buena regulación de voltaje y estabilidad.

La caída vectorial de tensión da por resultado una



diferencia vectorial entre las dos tensiones extremas de la línea. El ángulo que forman aquéllas puede llegar a comprometer la estabilidad y la diferencia de los módulos da una caída en el voltaje que, si es demasiado elevada, no permite la regulación de la tensión por medio de la excitación de los generadores y condensadores síncronos. Por esto, es conveniente la inyección de f. e. m. en las líneas muy largas.

Vamos a determinar ahora el desfase adecuado en la práctica para los f. e. m. que se ha de inyectar. Si, para simplificar, tomamos como ecuaciones de la línea las (165), resulta que la caída vectorial de tensión vale aproximadamente:

$$\dot{U}_1 - \dot{U}_0 = \dot{Z} \dot{I}_0 \quad (91)$$

La simplificación de esta ecuación se basa en suponer las características localizadas y despreciar el efecto de la capacidad.

Haciendo coincidir el eje real positivo (fig. 32) con el vector  $\dot{U}_0$  y designando por  $I_a$  e  $I_r$  la componente activa y reactiva de la corriente  $\dot{I}_0$ , la caída de tensión  $E$  vale (según la 91):

$$\dot{E} = \dot{U}_1 - \dot{U}_0 = \dot{Z} (I_a - j I_r) = \dot{E}_a + \dot{E}_r \quad (92)$$

en la que se hace:

$$\dot{E}_a = I_a \dot{Z} = I_a (R + j X) \quad (93)$$

$$\dot{E}_r = -j I_r \dot{Z} = I_r (X - j R) \quad (94)$$

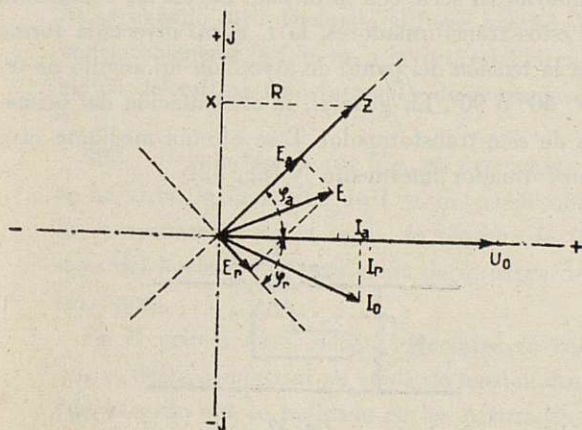


Fig. 31

Estas ecuaciones demuestran que la caída vectorial de tensión  $\dot{E}$  está formada de dos vectores componentes  $\dot{E}_a$  y  $\dot{E}_r$  (fig. 31). La primera sólo depende de la

corriente activa, y la segunda sólo de la reactiva. Estos dos vectores componentes son perpendiculares, la fase  $\varphi_a$  de  $\dot{E}_a$  viene determinada por:

$$\tan \varphi_a = \frac{X}{R} = \frac{x}{r} \quad (95)$$

y la de la componente  $\dot{E}_r$  por:

$$\tan \varphi_r = -\frac{R}{X} = -\frac{r}{x} \quad (96)$$

o bien:

$$\varphi_r = \varphi_a - 90^\circ \quad (97)$$

En la práctica, las largas líneas de transmisión trabajan con cargas de factor de potencia cerca de la unidad; por esto, en muchos casos es económico compensar solamente la caída de tensión debida a la potencia activa inyectando en el extremo generador de la línea una f. e. m. igual a la  $\dot{E}_a$  o igual a  $-\dot{E}_a$  en el extremo receptor. En caso de desear una compensación más completa debe inyectarse además otra f. e. m. igual a la  $\dot{E}_r$  en el extremo generador o igual a  $-\dot{E}_r$  en el receptor.

Estas dos f. e. m. que hay que inyectar deben ser regulables en magnitud sin variar la fase, con lo que se puede compensar la caída de tensión de cualquier carga transmitida. Regulando automáticamente la  $\dot{E}_a$  en función de la potencia activa y la  $\dot{E}_r$  en función de la reactiva, se obtendría automáticamente una compensación de la caída de tensión de la línea.

Para obtener una máxima compensación precisaría dar a las f. e. m. inyectadas los desfases determinados por las fórmulas (95 y 97), los cuales dependen de las características de las líneas; pero no resulta práctico dar a estos desfases valores distintos de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  ó  $90^\circ$  (véase Apartado 325). Por otro lado, como las fórmulas son aproximadas, no se obtendría una exacta compensación, aunque se ajustasen los desfases a sus valores exactos.

### 323. Caso de líneas de resistencia despreciable.—

En las líneas de gran sección, la resistencia es despreciable al lado de la reactancia y según fórmulas (95 y 97), resulta:

$$\begin{aligned} \varphi_a &= 90^\circ \\ \varphi_r &= 0^\circ \end{aligned} \quad (98)$$

Esto indica que la caída de tensión debida a la potencia activa está aproximadamente en cuadratura, pro-



vocando principalmente un giro del vector tensión a lo largo de la línea, que perjudica a la estabilidad. En cambio, la caída de tensión debida a la potencia reactiva está aproximadamente en fase, provocando principalmente una diferencia en el valor eficaz de la tensión a lo largo de la línea, que perjudica a la regulación de la tensión.

La caída de tensión  $\dot{E}_n$  debida a la potencia activa puede compensarse aproximadamente inyectando una f. e. m. transversal ( $\varphi_n = 90^\circ$ ), por medio de un transformador adecuado (véase Apartado 325). Si se desea compensar además la caída de tensión de la potencia reactiva, se deberá inyectar una f. e. m. longitudinal ( $\varphi_r = 0^\circ$ ).

324. *Caso de líneas de resistencia no despreciable.* Sabido es que la reactancia de las líneas aéreas por kilómetro de conductor viene en función logarítmica de  $D/d$ , siendo  $D$  la distancia media geométrica entre los conductores, y  $d$  el diámetro de los mismos (véase fórmula 115 para el cálculo de la inductancia  $L$  por kilómetro de conductor). De ello resulta que la reactancia por Km. de conductor varía poco de una línea a otra. Considerando  $D/d = 280$  se encuentra por reactancia 0,42 ohmios por Km. de conductor.

Admitiendo ahora que en las largas líneas de transmisión los conductores de mayor resistencia eléctrica que se emplean sean de 107 mm.<sup>2</sup> de aluminio, resulta, como resistencia máxima, 0,27 ohmios por Km. y tomando la reactancia de 0,42 ohmios por Km. de conductor, las fórmulas (95 y 97) nos dan:

$$t_g \varphi_n = \frac{0,42}{0,27} = 1,54$$

$$\begin{aligned} \varphi_n &= 57^\circ \text{ aproxim. } 60^\circ \\ \varphi_r &= -33^\circ \text{ aproxim. } -30^\circ \end{aligned} \quad (99)$$

Toda línea de sección mayor estará comprendida entre estas fórmulas (99) y las (98), resultando para la misma:

$$\begin{aligned} 60^\circ &< \varphi_n < 90^\circ \\ -30^\circ &< \varphi_r < 0^\circ \end{aligned} \quad (100)$$

Como no es práctico dar a  $\varphi_n$  valores distintos de  $60^\circ$  ó  $90^\circ$  y a  $\varphi_r$  valores distintos de  $-30^\circ$  ó  $0^\circ$  (ver Apartado 325), en cada caso particular habrá que decidirse

por uno u otro de estos valores. El par de valores promedio de estos dos es:

$$\begin{aligned} \varphi_n &= 75^\circ \\ \varphi_r &= -15^\circ \end{aligned} \quad (101)$$

que, según la fórmula (95), corresponde a la resistencia de:

$$r = \frac{x}{t_g \varphi_n} = \frac{0,42}{3,75} = 0,1125 \text{ ohm./km.}$$

y a una sección de 160 mm.<sup>2</sup> de cobre.

Así, tratando de hallar la máxima aproximación, los desfases indicados en las fórmulas (98) podrán emplearse para secciones mayores a unos 160 mm.<sup>2</sup> de cobre, y los de las fórmulas (99) para secciones menores.

Luego, en líneas de sección menor a 160 mm.<sup>2</sup> de cobre, puede compensarse aproximadamente la caída de tensión debida a la potencia activa inyectando una f. e. m. defasadas de  $60^\circ$  y la debida a las potencias reactivas puede lograrse también aproximadamente con un desfase de  $30^\circ$  en la f. e. m. inyectada. Las líneas de sección mayor a 160 mm.<sup>2</sup> de cobre pueden considerarse, para esta cuestión, como líneas de resistencia despreciable.

325. *Manera de realizar la inyección de f. e. m.*— En la práctica, la inyección de f. e. m. puede realizarse mediante transformadores  $T$  (fig. 32), que tienen el primario en derivación con la línea, y el secundario, en serie con la misma. Según las conexiones de estos transformadores, la f. e. m. inyectada forma con la tensión del punto de inyección un ángulo de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  ó  $90^\circ$ . En general, la alimentación del primario de este transformador  $T$  se efectúa mediante otro transformador intermedio  $N$  (fig. 32).

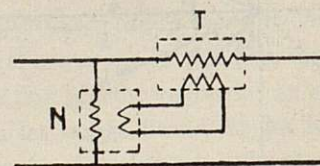


Fig. 32

La magnitud de la f. e. m. inyectada puede regularse conectando más o menos espiras del secundario del transformador intermedio  $N$ . Si se desea una regulación más fina puede intercalarse entre los trans-



formadores N y T un regulador que varíe la magnitud de la tensión, sin variar la fase, como, por ejemplo, un regulador de bobina móvil o un doble regulador de inducción con sus dos inducidos conectados en serie y con decalajes iguales y en sentido contrario.

Para inyectar f. e. m. longitudinales, es decir, en fase (ángulo de  $0^\circ$ ), el transformador N podrá ser estrella/estrella, y el primario del T también estrella, o bien el N triángulo/estrella y el primario del T en triángulo. Si damos una permutación circular de fases en la alimentación del transformador T, y cambiamos de polaridad, daremos un giro de  $60^\circ$  a las f. e. m. inyectadas; como se ha visto, esto tiene interés en algunos casos (Apartado 324).

Para inyectar f. e. m. transversales, esto es, en cuadratura con la tensión, el transformador N podrá ser triángulo/estrella, y el primario del T en estrella, o bien el N estrella/estrella, y el primario del T en triángulo, procurando que cada fase de la línea quede conectada en la fase del transformador T que se alimenta entre las otras dos, resultando así un giro de  $90^\circ$  en la f. e. m. inyectada. Si damos ahora una permutación circular de fases en la conexión del transformador T agregaremos un giro de  $120^\circ$  en la f. e. m., resultando un desfase de  $30^\circ$  en la f. e. m. inyectada. Este desfase es conveniente en algunos casos (Apartado 324).

Cuando en el punto de inyección de la f. e. m. debe haber un transformador de potencia, éste puede al propio tiempo utilizarse como transformador intermedio N, agregando otro devanado si fuese preciso. También podría obtenerse la f. e. m. a inyectar del circuito magnético del mismo transformador de potencia.

326. *Regulación de las f. e. m. inyectadas.*—Según se ha visto, la inyección de f. e. m. puede obedecer a la compensación de la caída de tensión de largas líneas del bucle o a la regulación de la carga de una de sus líneas.

En el primer caso, deben inyectarse en cada línea que se desee compensar su caída de tensión dos f. e. m. (de acuerdo con lo indicado en los Apartados anteriores, de 322 a 325): una, para la compensación de la caída provocada por la potencia activa, y otra, para la de la reactiva. Estas dos f. e. m. deben regularse haciendo que la tensión de alimentación del transformador T de la figura 32 (Apartado 325) obedezca a

las indicaciones de aparatos de medida de la carga de la línea. Esto puede conseguirse con la instalación de un watímetro de potencia activa y otro de reactiva que, con sus respectivos sistemas de mando, accionen sus correspondientes reguladores intercalados entre los transformadores N y T (fig. 32).

Si el factor de potencia de las cargas es próximo a la unidad, sólo se compensa generalmente la caída

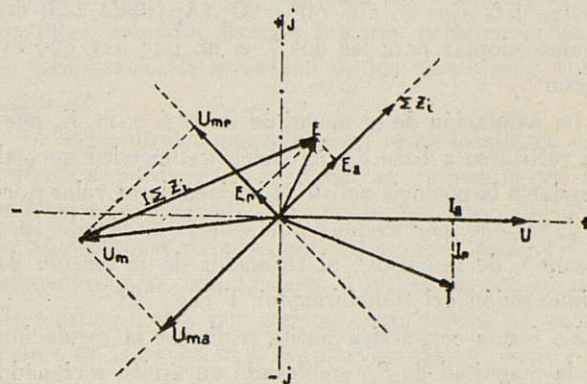


Fig. 33

provocada por la potencia activa, y bastará inyectar una sola f. e. m.

Para regular la carga de una línea del bucle basta inyectar en cualquier punto del mismo dos f. e. m. regulables, sólo en su magnitud, cuya resultante sea la E determinada por la fórmula (90). En general, el punto de inyección es uno de los extremos de la línea a regular.

Si en la fórmula (90) se hace coincidir el eje real positivo (fig. 33) con el vector tensión en el punto de inyección y designamos por  $I_a$  e  $I_r$  la corriente activa y reactiva de la línea, la f. e. m. a inyectar viene representada por:

$$\dot{E} = \dot{U}_{ma} + \dot{U}_{mr} + (I_a - jI_r) \sum_1^s \dot{Z}_i = \dot{E}_a + \dot{E}_r \quad (102)$$

en la que:

$$\dot{U}_{ma} + \dot{U}_{mr} = \dot{U}_m \quad (103)$$

y puede hacerse:

$$\dot{E}_a = \dot{U}_{ma} + I_a \sum_1^s \dot{Z}_i \quad (104)$$

$$\dot{E}_r = \dot{U}_{mr} - jI_r \sum_1^s \dot{Z}_i \quad (105)$$



Según las fórmulas (84 y 103), los primeros términos  $\dot{U}_{ma}$  y  $\dot{U}_{mr}$  son independientes de la corriente  $I$  a regular. En cuanto a los segundos términos, el de la (104) sólo depende de la corriente activa  $I_a$  y el de la (105) sólo de la reactiva  $I_r$ .

La aplicación de estas fórmulas (104 y 105) a los distintos regímenes posibles del bucle nos darán los diferentes valores de  $\dot{E}_a$  y  $\dot{E}_r$  y, por lo tanto, su fase y magnitud. Esto nos permitirá decidir cuál de los cuatro defasajes  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$  (Apartado 325) debemos adoptar para las dos f. e. m. que hay que inyectar.

La regulación de la magnitud de la f. e. m.  $E_a$  puede realizarse a base de un «relé» watimétrico que, al desviarse la potencia activa de la línea de su valor normal, accione, por medio de un sistema de mando (por ejemplo, de impulsos), al regulador de la tensión de alimentación del transformador  $T$  (fig. 32).

En forma correlativa puede realizarse la regulación de la magnitud de  $E_r$ , empleando un «relé» accionado por la potencia reactiva de la línea.

Si, con objeto de compensar caídas de tensión, se inyectan en el bucle otras f. e. m., los cálculos deben efectuarse teniendo en cuenta que  $\dot{E}$  de las fórmulas (90 y 102) es la suma vectorial de todas las f. e. m. inyectadas en el bucle. Restando de  $\dot{E}$  las f. e. m. destinadas a compensar las caídas de tensión se obtiene la que debe regular la carga de la línea.

327. *Influencia de las f. e. m. inyectadas en las cargas de las centrales.*—Las f. e. m. inyectadas tienen influencia sobre las tensiones de todo el bucle y sobre las potencias reactivas de las centrales. Variando estas f. e. m. se modificarán, por lo tanto, la repartición de las potencias reactivas entre las centrales y las tensiones de las mismas; pero, mientras no se actúe en la admisión de las turbinas, la repartición activa no sufrirá variación.

### 33.— REGULACIÓN DE LAS POTENCIAS REACTIVAS EN LAS CENTRALES

No es necesario demostrar aquí que, si tenemos varios alternadores funcionando en paralelo, al modificar la excitación de uno solo de ellos, la tensión no sufre prácticamente alteración y sólo varía la repartición de la potencia reactiva entre ellos. Para mo-

dificar la tensión será preciso variar la excitación de todos los alternadores o, por lo menos, en varios de ellos.

Varias centrales en paralelo pueden considerarse como varios alternadores acoplados a través de unas impedancias que representan la red de conexión. Al modificar la excitación de una central se alterará la repartición de la potencia reactiva en forma que el incremento que sufra esta potencia en esta central sea igual y de signo contrario a la suma de todos los incrementos que sufra en las otras centrales. Como esto trae consigo una alteración de las corrientes que circulan por la red, las tensiones variarán algo en todas las centrales, y en mayor grado en la que se ha modificado la excitación.

331. *Regulación de la tensión.*—El caso más sencillo de regulación de tensión es el de una central que alimenta a una estación receptora a través de una línea de transmisión (fig. 34). Para estudiar primeramente este caso, analizaremos las siguientes soluciones:

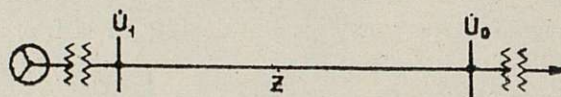


Fig. 34

1.<sup>a</sup> Regulación de la tensión en la central, a fin de que la de la estación receptora sea constante para todos los regímenes de carga.

2.<sup>a</sup> Conseguir que sea constante, para todas las cargas, la diferencia de voltaje entre los extremos de la línea, mediante un condensador síncrono instalado en la estación receptora.

3.<sup>a</sup> Combinación adecuada de los dos métodos anteriores.

4.<sup>a</sup> Compensación de la caída de tensión de la línea, inyectando f. e. m. en la misma (Apartado 322), además del empleo de alguno de los métodos anteriores.

El método primero es el más sencillo de todos, pero si la línea es relativamente larga, puede resultar, para las cargas máxima y mínima, voltajes en la central que sean demasiado diferentes para poderse adaptar a la práctica.

El segundo método se funda en que la diferencia de



voltajes entre los extremos de la línea depende en gran modo de la potencia reactiva que transmite, y, por lo tanto, modificando convenientemente esta potencia reactiva, ajustaremos el voltaje de la estación receptora a un valor constante sin variar el de la central.

En la práctica, la tensión de la estación receptora debe estar sobrecompensada; esto es, durante la carga baja, para compensar así las caídas de tensión de las redes de distribución.

Como es sabido, los condensadores síncronos son motores síncronos funcionando en vacío, a los que se les equipa con un regulador automático de excitación. Al variar la tensión de la estación receptora, el regulador modifica la excitación y el motor su potencia reactiva hasta que la variación de la que absorbe la estación receptora haya alterado suficientemente la caída de tensión de la línea.

Como, generalmente, en la práctica puede permitirse una cierta diferencia en el voltaje de la central entre las horas de carga máxima y las de mínima, se combinan los dos métodos anteriores dando lugar al tercero. Éste tiene la ventaja de exigir condensadores síncronos de menor capacidad.

Si la línea es extraordinariamente larga (varios centenares de kilómetros), puede ser necesaria la inyección de f. e. m. para compensar la diferencia entre los voltajes de los extremos de la misma (método cuarto). En estos casos, debido a la gran longitud de la línea, el desplazamiento angular entre las tensiones vectoriales extremas de la misma puede comprometer su estabilidad (Apartado 11). Entonces, es preciso también compensar este desplazamiento mediante la inyección de f. e. m. transversales u otro de los procedimientos citados en el Apartado 11.

Pasando ahora a una red en bucle, resulta que el primer método sólo bastará en un bucle reducido y con una sola estación receptora. Si el bucle contiene varias de estas estaciones, en general, no será posible simultáneamente el voltaje de todas ellas por medio de las centrales; será, por tanto, preciso el empleo de los condensadores síncronos para que cada estación receptora pueda regular su propio voltaje (métodos segundo y tercero).

Para la regulación del propio voltaje de la estación receptora, podría cambiarse la relación de los transformadores reductores en determinadas horas, o emplear

un regulador que agregase un incremento variable en la tensión que recibe la estación. Pero el condensador síncrono presenta la ventaja de que funcionando sobreexcitado, mejora el  $\cos \varphi$  de la estación receptora y el rendimiento de la red, al propio tiempo que mejora el factor de potencia en las centrales.

Teóricamente, se obtendrían resultados parecidos mediante baterías de condensadores estáticos, regulando en forma automática la conexión y desconexión de algunos elementos. Pero los resultados prácticos son distintos, debido a diversos factores, principalmente, a la complicación y seguridad de los mecanismos automáticos.

Si hay centrales que alimenten redes locales de distribución, puede ser que, cuando el régimen de tensiones sea el conveniente al bucle, no sea adecuado para la alimentación de estas redes. Entonces, será preciso alimentar estas redes locales a través de reguladores de tensión, como, por ejemplo, reguladores de inducción o de bobina móvil. En muchos casos es suficiente cambiar la relación de los transformadores que alimentan estas redes locales, en horas de cambio de carga.

Si el bucle contiene líneas de gran longitud, puede ser conveniente la inyección de f. e. m. (método cuarto.)

332. *Manera de estudiar la repartición de las potencias reactivas.*—Volviendo al caso más sencillo de una sola central que alimenta aisladamente una carga (fig. 34), al variar la excitación de las máquinas, se altera el voltaje, estando la carga reactiva de acuerdo con la demanda de la estación receptora. En el caso de una red con varias centrales en paralelo, al modificar la excitación de una de ellas, se modifica la potencia reactiva de la misma, lo que provoca una variación de las caídas de tensión de la red y, por lo tanto, una alteración más o menos grande en el voltaje de todas las centrales. Así resulta que la repartición de la potencia reactiva está íntimamente ligada con la regulación de la tensión.

En el estudio de la participación de las potencias reactivas en las centrales intervienen los factores siguientes:

- 1.º Los programas de carga de las centrales, en los cuales sólo figura, en general, la repartición de la potencia activa, de acuerdo con las conve-



niencias de explotación (reservas hidráulicas, caudales de los ríos, existencia de combustible, etc.).

- 2.º El régimen de voltaje en las estaciones receptoras, con objeto de dar una tensión adecuada a las redes de distribución.
- 3.º Las tensiones máxima y mínima que se pueden tolerar en las centrales.
- 4.º La relación de los transformadores elevadores y reductores.
- 5.º La carga de los condensadores síncronos.
- 6.º La potencia reactiva que representa la capacidad electrostática de las líneas.
- 7.º Las diferencias de voltaje entre los extremos de las líneas.
- 8.º Si el bucle es extenso, el desplazamiento angular entre las tensiones vectoriales. Esto interviene notablemente en el estudio de la estabilidad.
- 9.º Las f. e. m. inyectadas en caso de haberlas.
- 10 La obtención del mejor rendimiento posible en la transmisión.
11. El poder conseguir los mejores factores de potencia en las centrales, con objeto de obtener el mejor rendimiento y aprovechamiento de las instalaciones en las horas de carga máxima.

Evidentemente que este estudio no puede llevarse a cabo como un problema matemático, en el que, aplicándole una serie de ecuaciones y métodos de cálculo, se encuentra la resolución de una forma más o menos mecánica, sino que su resolución consiste en tantear varias soluciones, y en escoger las más prácticas y económicas.

Estos tanteos exigen repetidas resoluciones del bucle (Apartado 311 y 312), resultando, en general, un laborioso trabajo. El auxilio de una red miniatura como instrumento de cálculo para la resolución del bucle y tantear distintas soluciones, puede facilitar grandemente el trabajo.

En la práctica, la excitación de las centrales generalmente se ajusta manual o automáticamente, obediendo a la regulación de la tensión. La repartición de la potencia reactiva entre las centrales es la que resulte de esta regulación. Con el estudio previo citado o tanteos sobre la red real, podrá decidirse la relación más conveniente de los transformadores y establecer

los regímenes de voltaje para una buena repartición de la potencia reactiva.

### 333. *Capacidad de los condensadores síncronos.*—

La capacidad necesaria para los condensadores síncronos de una red está ligada con los factores expuestos en el Apartado anterior (332), y debe decidirse, en definitiva, tanteando algunas soluciones posibles, teniendo en cuenta, desde luego, el factor económico. Teóricamente, podría estudiarse para que los condensadores síncronos fuesen suficientes, por sí solos, para conseguir un voltaje constante y un sobrecompensado en las propias estaciones receptoras; pero, en general, se tolera una variación en el voltaje de las centrales, resultando así soluciones más económicas.

Partiendo de las ecuaciones generales de una línea (Apéndice I), es fácil demostrar que, para una potencia activa suministrada a la estación receptora (fig. 34), las pérdidas mínimas por el efecto Joule en la línea tienen lugar cuando la estación receptora absorbe una potencia reactiva aproximadamente igual a la mitad de la que da la línea en vacío. Para comprenderlo, basta imaginar la línea sustituida por el circuito equivalente en  $\pi$  (Apéndice I — f), y observar que cuando se cumple esta condición habrá la mínima corriente circulando por  $Z_0$  (fig. 30).

Si, por tratarse de líneas cortas y tensiones no muy altas, el efecto de la capacidad electrostática es pequeño, la indicada condición conduciría a factores de potencia muy cerca de la unidad en los dos extremos de las líneas; en las estaciones receptoras sería inductivo y en las centrales sería capacitativo. En líneas con importante efecto de capacidad electrostática, este factor de potencia resultaría apreciablemente distinto de la unidad y capacitativo en las centrales, lo que exigiría una pequeña excitación de las máquinas, en perjuicio de su buena estabilidad.

En general, se procura que el factor de potencia en las centrales sea lo más próximo posible a unidad, o ligeramente inductivo. Para conseguirlo, la potencia reactiva de las estaciones receptoras debe ser aproximadamente compensada con la de los condensadores síncronos más la que dan las líneas en vacío. Esto nos proporciona un medio para estimar en un anteproyecto la capacidad de los condensadores síncronos de una red. En tal caso, la corriente de capacidad y potencia reactiva en vacío de una línea puede determinarse,



suponiendo las características localizadas, por las conocidas fórmulas siguientes:

$$I_L = 2\pi f C l \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (106)$$

$$Q_L = 2\pi f C l U^2 \quad (107)$$

En las que  $l$  es la longitud de la línea en Km. y  $U$  la tensión eficaz entre fases.

Para largas líneas puede determinarse más exactamente por los gráficos (5 y 6).

El valor de la capacidad kilométrica  $C$ , se halla por la conocida fórmula 116 (Apéndice I), y si estimamos  $D/d = 280$ , se encuentra  $C = 0,0088$  microfaradios por Km. de conductor. Substituyendo este valor en la (107), se tiene, aproximadamente

$$Q_L = 2,76 l^2 \cdot 10^{-6} \quad (108)$$

La potencia reactiva del condensador síncrono de una estación receptora también puede estimarse fijando una diferencia de voltajes extremos de las líneas del bucle que alimentan la estación. En tal caso, si se trata de líneas cortas, pueden substituirse por su circuito equivalente en y la diferencia de voltajes extremos expresada en voltios entre fases calcularla aproximadamente por la fórmula

$$\varepsilon = \sqrt{3} R I \cos \varphi + \sqrt{3} X I \sin \varphi \quad (109)$$

la cual proviene de tomar como diferencia de voltajes la proyección del vector caída de tensión sobre la tensión en el extremo final (véase «Metalurgia y Electricidad», de noviembre de 1943).

334. *Excitación de las máquinas.*—El objeto de la red y las centrales es precisamente suministrar la potencia a las estaciones receptoras con un adecuado régimen de voltaje en las mismas. En general, la excitación de las máquinas se regula automáticamente para tener en las centrales el régimen de tensión estudiado y establecido previamente. La excitación de los condensadores síncronos también se regula automáticamente obedeciendo al régimen de voltaje establecido para la propia estación receptora.

Así, la repartición de la potencia reactiva entre las centrales es la que resulta de la regulación de la tensión. Si esta repartición no es adecuada, ya sea por no dar factores de potencia, aproximadamente iguales en todas las centrales, o por algún otro motivo parti-

cular, deben tantearse otros regímenes de voltaje cambiando, si es preciso, la relación de algunos transformadores.

La regulación de la excitación de las máquinas se realiza por medio de los conocidos reguladores, ya sea del tipo Tirrill, Brown Boveri o de otro cualquiera. Supondremos conocido del lector el funcionamiento de estos aparatos y no creemos necesario describir aquí ninguno de ellos.

La tendencia moderna es emplear reguladores de excitación muy rápidos, para favorecer a la estabilidad, durante las perturbaciones. Para esto, se utilizan los conocidos procedimientos de hiperregulación, en los que la excitatriz es de una excitación independiente, empleando para ello otra excitatriz auxiliar. Esto da al campo de la excitación principal una tensión superior a la necesaria, que se reduce intercalando una resistencia en serie. Así, en el momento de una perturbación, puede «shuntarse» esta resistencia en serie, y la excitación de la excitatriz principal recibe rápidamente una tensión superior a la normal, aumentando con rapidez la excitación del alternador.

El conocido funcionamiento de los reguladores de excitación generalmente se basa en un elemento móvil que obedece a dos fuerzas o pares, uno, motor, y otro antagonista, que están en equilibrio cuando no hay que modificar la excitación. La fuerza o par motor es sensiblemente proporcional al cuadrado de la tensión que da el alternador, y la fuerza o par antagonista es dado generalmente por un resorte adecuado.

Si hay varias centrales, es suficiente regular la tensión con algunas de ellas. Entonces, puede regularse la excitación de las centrales restantes para tener un determinado factor de potencia en las mismas, en general, próximo a la unidad. Para realizar esto, el elemento motor del regulador debe supeditarse al  $\cos \varphi$  de la carga de la máquina, en lugar de la tensión.

Para concretar, y como ejemplo, puede citarse el siguiente dispositivo (fig. 35) para regular el  $\cos \varphi$  aproximadamente entre 0,5 y la unidad. En el cual, el elemento motor del regulador se alimenta con la corriente de una fase y una tensión tomada de dos transformadores de potencial conectados en V. Si se trata de regular a  $\cos \varphi = 1$  el potenciómetro debe estar conectado en M (fig. 35); entonces, la corriente y tensión que recibe el elemento motor están en cuadra-



tura y este no da par, permaneciendo en equilibrio (sin necesidad de resorte antagonista). Desplazando el contacto M del potenciómetro, decalaremos la tensión del motor y, el equilibrio de éste tendrá lugar para otro valor de  $\varphi$  distinto de cero. El decalaje

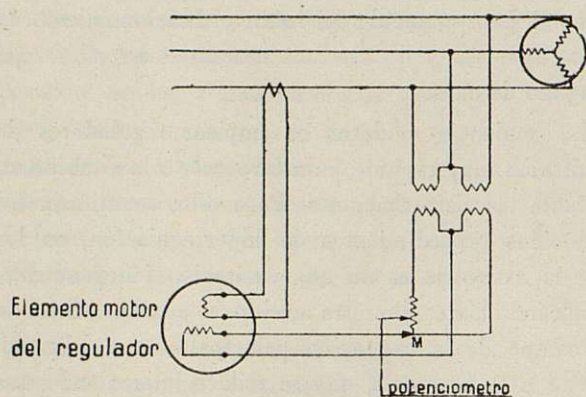


Fig. 35

máximo que se puede dar a la tensión es de  $60^\circ$  correspondiendo a  $\cos \varphi = 0,5$ .

Un regulador así concebido obedecería únicamente al factor de potencia, y tiene el inconveniente de desexcitar la máquina al presentarse un corto-circuito, lo que es el perjuicio de la estabilidad. Esto se comprende, observando que la corriente de corto-circuito es de  $\cos \varphi$  aproximadamente igual a 0,5 ó menos (\*).

Este inconveniente puede evitarse con reguladores mixtos de tensión y de factor de potencia, que obedezcan en forma rápida a toda variación de voltaje y que corrijan lentamente la excitación cuando el factor de potencia no sea el adecuado. Se conciben como un regulador de tensión normal, agregándole un aparato sensible al desfase  $\varphi$ ; por ejemplo, como el de la figura 35, con un sistema de mando a impulsos u otro de lento que pueda modificar el voltaje del elemento motor sin que varíe el que da el alternador. Así, cuando el factor de potencia se desvía del valor adecuado, este dispositivo va aumentando o disminuyendo lentamente el voltaje que recibe el regulador y éste modificando la excitación de la máquina hasta corregir el factor de potencia, y, en ese momento, se restablece el equilibrio.

(\*) Este valor depende de la relación entre resistencia reactancia de las líneas, máquinas y transformadores.

### 34.—APERTURA Y CIERRE DEL BUCLE EN SERVICIO

No creemos necesario insistir en que la abertura y cierre del bucle en servicio debe realizarse con interruptores de aceite. Si esta maniobra obedece a un cambio de esquema, el interruptor no debe cortar ninguna corriente elevada y puede ser de muy baja capacidad de ruptura. Si se trata de abrir el bucle para la localización automática de defectos, el interruptor debe tener la capacidad de ruptura suficiente para cortar la corriente de corto-circuito; este caso, entendemos que corresponde al estudio de las protecciones de las líneas del bucle y, por lo tanto, fuera del alcance del tema.

La resolución del bucle, abierto en un punto M (fig. 27) no ofrece dificultad por ser, precisamente, una serie de centrales y estaciones receptoras conectadas en cadena abierta (Apartado 31).

En cuanto a la regulación de las cargas de las líneas del bucle cerrado o abierto, ya se ha indicado que al abrirlo aumenta en una unidad el número de líneas regulables por medio de las centrales (Apartado 32).

En el Apartado 31 se expone la resolución del bucle en un estado cualquiera y las fórmulas (83 y 84) nos dan la tensión  $\dot{U}_m$  que aparecerá en el interruptor una vez abierto el bucle en un punto M (figs. 27 y 29).

341. *Abertura del bucle.*—Para no provocar ningún cambio brusco en las tensiones y potencias reactivas al abrir el bucle en un punto cualquiera M, sería preciso previamente la carga de la línea que se ha de cortar hasta conseguir la anulación de su corriente. Teóricamente siempre es posible conseguir esto en cualquiera de las líneas del bucle, por medio de la regulación en las centrales (Apartado 32); pero puede darse el caso que esto exija potencia negativa en algunas centrales; esto es, funcionar como motor. Entonces, en la práctica, no será posible anular completamente la corriente de la línea que hay que cortar, a menos de inyectar f. c. m. regulables en el bucle.

Estos casos dependen de la situación relativa de las centrales y estaciones receptoras y de las características de las líneas. Para ver si una determinada línea se encuentra en esta condición, sería preciso tantear varios estados de carga de las centrales y resolver el bucle en cada uno de ellos, hasta encontrar uno en el que la corriente de la línea considerada sea nula, o



ver que esto no es posible en ningún estado factible, en la práctica.

En algunos casos particulares, como por ejemplo, cuando el bucle tiene una sola estación receptora (figura 27), es fácil observar *a priori* algunas líneas que se encuentran en esta condición (líneas *ad* y *cd*); para ello, basta imaginar el bucle abierto por la línea considerada *ad* o *cd* y se ve que no es posible ningún estado de cargas con los puntos *a* y *d* o bien *c* y *d* a igual tensión.

Las f. e. m. pueden inyectarse en cualquier punto del bucle, y así regulan cualquiera de las líneas que haya que cortar. Si la abertura se efectúa preferentemente en una central o estación determinada, será práctico realizar la inyección de las f. e. m., precisamente en esta central o estación, ya que ello facilitará la regulación de la línea que se corte. Como de las dos f. e. m. que se inyecten, una, regula aproximadamente la potencia activa, y otra, la reactiva, la instalación de un watímetro y un varímetro <sup>(°)</sup> en el punto de abertura facilitará la reducción a CERO de la carga de la línea.

En la práctica, puede intentarse prescindir de la inyección de las f. e. m., reduciendo la carga de la línea que se ha de cortar todo lo que sea posible, mediante la regulación de las potencias activas y reactivas en las centrales, y cortar la línea. Si el bucle no es demasiado extenso, en muchos casos, podrá tolerarse la oscilación que así se produce.

342. *Cierre del bucle.*—Para el cierre del bucle sin provocar ningún cambio brusco es preciso igualar la tensión a cada lado del interruptor. Teóricamente, puede conseguirse regulando las centrales; pero, correlativamente al caso de abertura, pueden darse casos que esto exija centrales que funcionen como motor. Estos son los mismos en los que en la abertura del bucle no podía conseguirse anular los amperios de la línea que se ha de cortar. En tales casos, para igualar la tensión a cada lado del interruptor será preciso la inyección de dos f. e. m. regulables en el bucle.

Estas dos f. e. m. deben regularse ahora para igualar vectorialmente la tensión a cada lado del interruptor. Esto exige la instalación de transformadores de

<sup>(°)</sup> Denominación que puede darse a un aparato para medir la potencia reactiva.

potencial y aparatos de comprobación de voltaje en los circuitos secundarios de los mismos.

Las dos f. e. m. pueden inyectarse en cualquier punto del bucle (como en el caso de abertura); sin embargo, si esta inyección se realiza en la central o estación donde hay el interruptor que se debe conectar, se facilitará grandemente la regulación de las f. e. m.

Si el bucle está abierto en más de un punto, pueden haber quedado centrales fuera de sincronismo, lo que exigiría sincronizar al efectuar los acoplamientos.

En la práctica, generalmente, puede tolerarse la oscilación que se produce en la tensión y potencias reactivas, al cerrar el bucle sin igualar previamente las tensiones de ambos lados del interruptor.

### 35.—CONCLUSIONES

La regulación de las cargas en una red en bucle cerrado, por medio de las centrales no es posible en todas sus líneas. Quedan sin regulación tantas líneas como estaciones receptoras más una.

Inyectando en el bucle dos f. e. m. de magnitud variable puede regularse así la carga de una línea cualquiera, pero sólo en una. De esta forma, puede conseguirse aumentar en una unidad las líneas con regulación; pero quedan sin ella tantas líneas como estaciones receptoras.

En las líneas de gran longitud es conveniente compensar total o parcialmente la caída vectorial de tensión inyectando f. e. m. de magnitud regulable.

La repartición de la potencia reactiva entre las centrales está íntimamente ligada con la regulación de la tensión. En general, esta regulación se realiza satisfactoriamente con una adecuada relación de transformación en los transformadores elevadores y reductores, con reguladores de excitación automáticos en las centrales y con condensadores síncronos equipados en reguladores automáticos en las estaciones receptoras.

La repartición de las potencias reactivas en las centrales no se regula directamente; es la que resulta de la regulación de voltaje. Si la repartición que así resulte no es adecuada, debe estudiarse y tantearse otro régimen, cambiando, si es preciso, las relaciones de algunos de los transformadores.

En la práctica, el estudio de la regulación de tensión y repartición de cargas consiste en coordinar y tantear distintas soluciones hasta encontrar regímenes acepta-



bles. Esto exige muchas resoluciones del bucle, lo que resulta laborioso trabajo, el cual puede ser notablemente facilitado con el auxilio de una red en miniatura.

Cuando hay varias centrales, puede ser aconsejable regular la excitación de algunas de ellas, según el factor de potencia de la carga, en combinación con el voltaje.

Para conseguir la abertura y cierre del bucle sin oscilación en la tensión y potencia reactiva, deben regularse previamente a CERO la carga de la línea que se va a cortar o igualarse las tensiones de ambos lados del interruptor que precisa conectar. Pueden darse casos en los que, para conseguir esto sea preciso la inyección en el bucle de dos f. e. m. de magnitud regulable. En la práctica puede tolerarse en muchos casos el cambio brusco que se produce al efectuar esta maniobra sin este requisito.

## APÉNDICE I

### LARGAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

#### a) Fórmulas generales.

El tener en cuenta que las características de las líneas están uniformemente repartidas en su longitud, da lugar a las conocidas fórmulas de Blondel con funciones hiperbólicas de variable compleja:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_0 \operatorname{ch} \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}} + \dot{I}_0 \dot{Z} \frac{\operatorname{sh} \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}}{\sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}} \quad (110)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_0 \dot{Y} \frac{\operatorname{sh} \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}}{\sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}} + \dot{I}_0 \operatorname{ch} \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}$$

siendo

$$\dot{Z} = (r + jx) l = (r + j\omega l) l \quad (111)$$

$$\dot{Y} = (g + jb) l = (g + j\omega C) l \quad (112)$$

La conductancia o perditancia  $g$  se considera despreciable siempre que no haya efecto corona, quedando la (112) convertida en

$$\dot{Y} = j\omega C l \quad (113)$$

Así, la variable independiente de las funciones hiperbólicas de las (110) vale:

$$\begin{aligned} \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}} &= 1 \sqrt{j\omega C (r + jx) l} = 1 \sqrt{j\omega C x \left( \frac{r}{x} + j \right) l} = \\ &= 2\pi f l \sqrt{LC} \sqrt{j \left( \frac{r}{x} + j \right)} = \\ &= 2\pi f l \sqrt{LC} \sqrt{j \frac{r}{x} - 1} \end{aligned} \quad (114)$$

En las líneas aéreas, se tienen las conocidas fórmulas:

$$L = 0,46 \log \frac{2,57 D}{d} \cdot 10^{-3} \text{ henrios/Km.} \quad (115)$$

$$C = \frac{0,0242}{\log \frac{2 D}{d}} \cdot 10^{-6} \text{ faradios/Km.} \quad (116)$$

De las cuales resulta:

$$LC = 0,46 \cdot 0,0242 \cdot 10^{-9} \frac{\log \frac{2,57 D}{d}}{\log \frac{2 D}{d}} \quad (117)$$

La razón  $D/d$  de la distancia entre conductores al diámetro está bajo forma logarítmica y, por lo tanto, el valor de  $LC$  será prácticamente igual en todas las líneas. Suponiendo  $D/d = 280$ , resulta de la (117):

$$LC = 1,11 \cdot 10^{-11} \frac{\log 2,57 \cdot 280}{\log 2 \cdot 280} = 1,16 \cdot 10^{-11} \quad (118)$$

Substituyendo este valor en la (114), se obtiene como variable independiente:

$$\sqrt{\dot{Z} \dot{Y}} = 2\pi f l \sqrt{1,16 \cdot 10^{-11}} \cdot \sqrt{j \frac{r}{x} - 1} \quad (119)$$

Los desarrollos en serie de las funciones hiperbólicas de la (110) son:

$$\begin{aligned} \operatorname{ch} \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}} &= 1 + \frac{\dot{Z} \dot{Y}}{2!} + \frac{\dot{Z}^2 \dot{Y}^2}{4!} + \dots \dots \dots \\ \frac{\operatorname{sh} \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}}{\sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}} &= 1 + \frac{\dot{Z} \dot{Y}}{3!} + \frac{\dot{Z}^2 \dot{Y}^2}{5!} + \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (120)$$



Según la (119), elevando al cuadrado y resolviendo operaciones:

$$\dot{Z} \dot{Y} = 4,58 f^2 l^2 \cdot 10^{-10} \left( j \frac{r}{x} - 1 \right) \quad (121)$$

Substituyendo esta compleja en las series (110), se determinan sus valores con la aproximación que se desee.

Para un valor determinado de  $r/x$ , la variable independiente de la (121) es la longitud eléctrica  $fl$  de la línea. Los gráficos 1 y 2 (extractos de «General Electric Review», de mayo 1926, pág. 321-329) dan los coeficientes reales e imaginarios de las funciones hiperbólicas complejas (120).

#### b) Expresiones ondulatorias.

Cuando se desea expresar la tensión y corriente de un punto de la línea situado a una distancia  $x$  del extremo receptor, las fórmulas (110) pueden escribirse

$$\dot{U}_x = \dot{U}_0 \operatorname{Ch} \dot{K} x + \dot{Z}_c \dot{I}_0 \operatorname{Sh} \dot{K} x \quad (122)$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{U}_0}{\dot{Z}_c} \operatorname{Sh} \dot{K} x + \dot{I}_0 \operatorname{Ch} \dot{K} x \quad (123)$$

en las que

$$\dot{K} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} \quad (124)$$

$$\dot{K} = \sqrt{\frac{r + j\omega L}{g + j\omega C}} \quad (125)$$

siendo  $\dot{Z}_c$  la impedancia característica de la línea.

Separando la parte real e imaginaria de  $\dot{K}$

$$\dot{K} = \alpha + j\beta \quad (126)$$

Si se substituye este valor en la (122), expresando al propio tiempo el coseno y seno hiperbólicos por las exponenciales del número en equivalentes, se encuentra:

$$\begin{aligned} \dot{U}_x &= \dot{U}_0 \frac{e^{(\alpha + j\beta)x} + e^{-(\alpha + j\beta)x}}{2} + \\ &+ \dot{Z}_c \dot{I}_0 \frac{e^{(\alpha + j\beta)x} - e^{-(\alpha + j\beta)x}}{2} = \\ &= \frac{\dot{U}_0 + \dot{Z}_c \dot{I}_0}{2} e^{(\alpha + j\beta)x} \frac{\dot{U}_0 - \dot{Z}_c \dot{I}_0}{2} e^{-(\alpha + j\beta)x} \end{aligned}$$

resultando para  $\dot{U}_x$  un vector de la forma

$$\dot{U}_x = \dot{A} e^{(\alpha + j\beta)x} + \dot{B} e^{-(\alpha + j\beta)x} \quad (127)$$

en la que

$$\dot{A} = \frac{\dot{U}_0 + \dot{Z}_c \dot{I}_0}{2} \quad (128)$$

$$\dot{B} = \frac{\dot{U}_0 - \dot{Z}_c \dot{I}_0}{2} \quad (129)$$

Recordando que las tensiones alternas senoidales se representan por vectores giratorios a la velocidad  $\omega$  y que  $e^{j\omega t}$  es el vector unidad que gira a esta velocidad, el vector giratorio que determina la tensión en el punto  $x$  se encuentra multiplicando ambos miembros de la (127) por  $e^{j\omega t}$ :

$$\begin{aligned} \dot{U}_x = e^{j\omega t} &= e^{\alpha x} \dot{A} e^{j(\omega t + \beta x)} + \\ &+ e^{-\alpha x} \dot{B} e^{j(\omega t - \beta x)} \end{aligned} \quad (130)$$

El valor instantáneo de la tensión alterna senoidal es el término real del vector giratorio  $\dot{U}_x e^{j\omega t}$ . Designando por  $\Theta_a$  y  $\Theta_b$  los argumentos de los vectores  $\dot{A}$  y  $\dot{B}$ , la (130) nos da

$$\begin{aligned} U_x &= e^{\alpha x} A \cos(\omega t + \beta x + \Theta_a) + \\ &+ e^{-\alpha x} B \cos(\omega t - \beta x + \Theta_b) \end{aligned} \quad (131)$$

El primer sumando  $A e^{\alpha x} \cos(\omega t + \beta x + \Theta_a)$  representa una onda senoidal amortiguada que avanza a la velocidad  $\omega/\beta$  en el sentido de las  $x$  decrecientes, o sea, hacia el extremo receptor de la línea. El segundo sumando representa, por el contrario, otra onda senoidal amortiguada que regresa del extremo receptor, también a la velocidad  $\omega/\beta$ .

Esto se comprende fácilmente observando los valores del primer sumando en dos puntos  $x_1$  y  $x_2$  y en los dos tiempos  $t_1$  y  $t_2$ , a condición de que se cumpla

$$\omega t_1 + \beta x_1 = \omega t_2 + \beta x_2$$

y, como estos puntos están en la misma fase y que la velocidad en pasar de  $x_1$  a  $x_2$  es

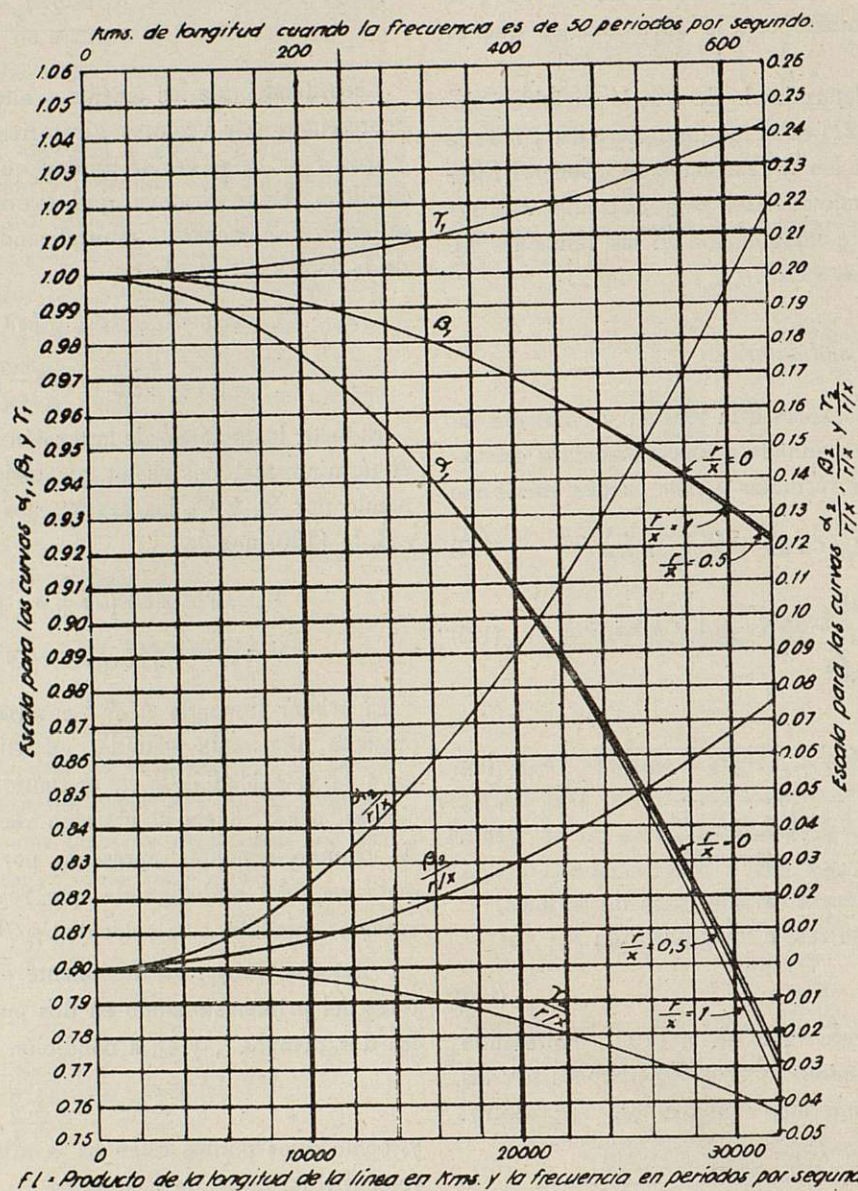
$$v = \frac{x_1 - x_2}{t_2 - t_1} = \frac{\omega}{\beta} \quad (132)$$

Análogamente para el segundo sumando, se encuentra:

$$\begin{aligned} \omega t_1 - \beta x_1 &= \omega t_2 - \beta x_2 \\ v &= \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\omega}{\beta} \end{aligned} \quad (133)$$



# **GRAFICO 1.- FUNCIONES HIPERBOLICAS COMPLEJAS.**



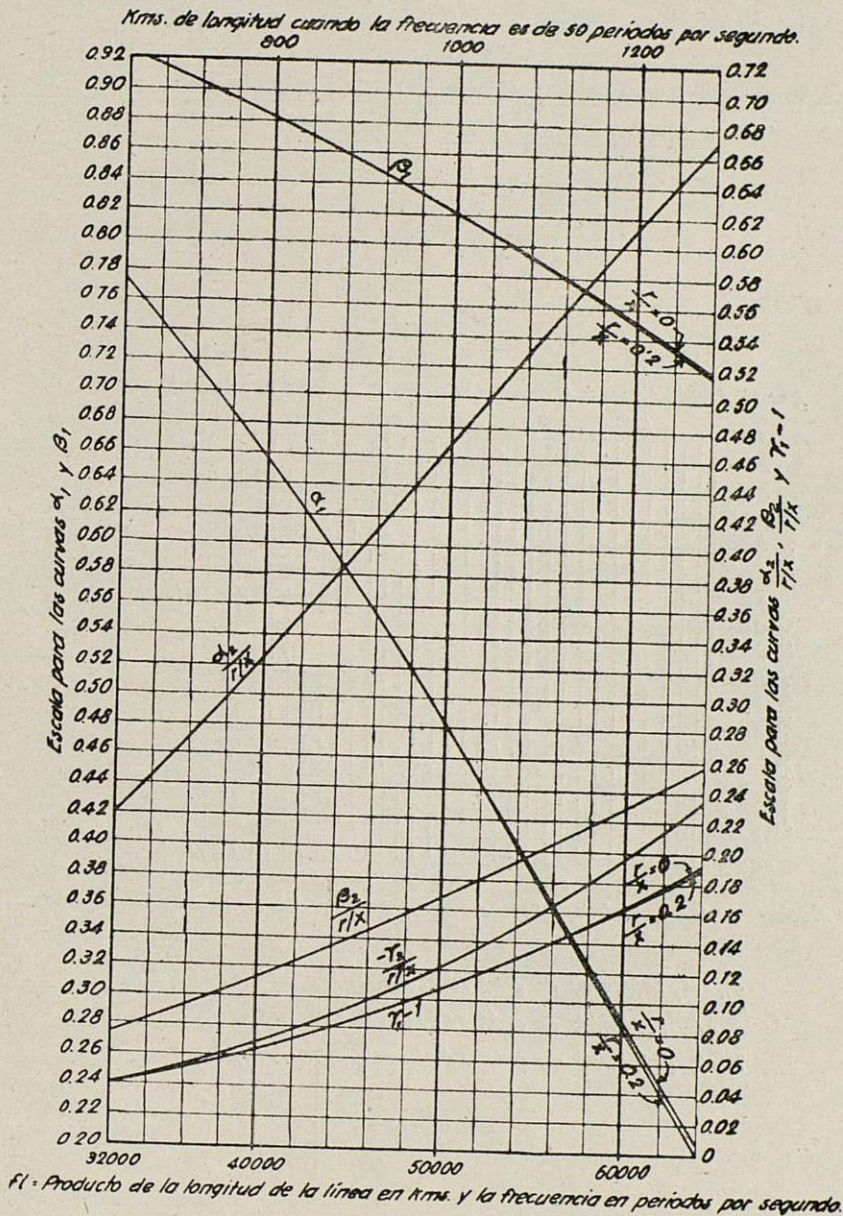
$$\cosh \sqrt{ZY} = 1 + \frac{ZY}{2} + \frac{Z^2 Y^2}{24} + \frac{Z^3 Y^3}{720} + \dots = \alpha_1 + j\alpha_2$$

$$\frac{\sinh \sqrt{ZY}}{\sqrt{ZY}} = 1 + \frac{ZY}{6} + \frac{Z^2 Y^2}{120} + \frac{Z^3 Y^3}{5040} + \dots = \beta_1 + j\beta_2$$

$$\tanh \frac{\sqrt{ZY}}{2} = 1 - \frac{ZY}{12} + \frac{Z^2 Y^2}{120} - \frac{17 Z^3 Y^3}{20160} + \dots = T_1 + jT_2$$

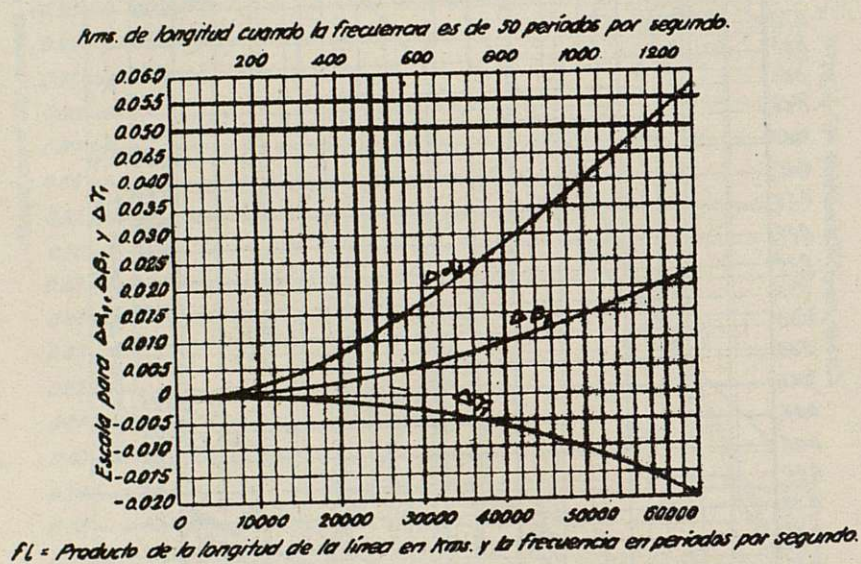


GRÁFICO 2.- FUNCIONES HIPERBOLICAS COMPLEJAS. (Continuación).





**GRAFICO 3:- Corrección de los valores de  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$ , obtenidos en gráf. 1 y 2, cuando LC no es igual a  $1'16 \cdot 10^{-11}$**



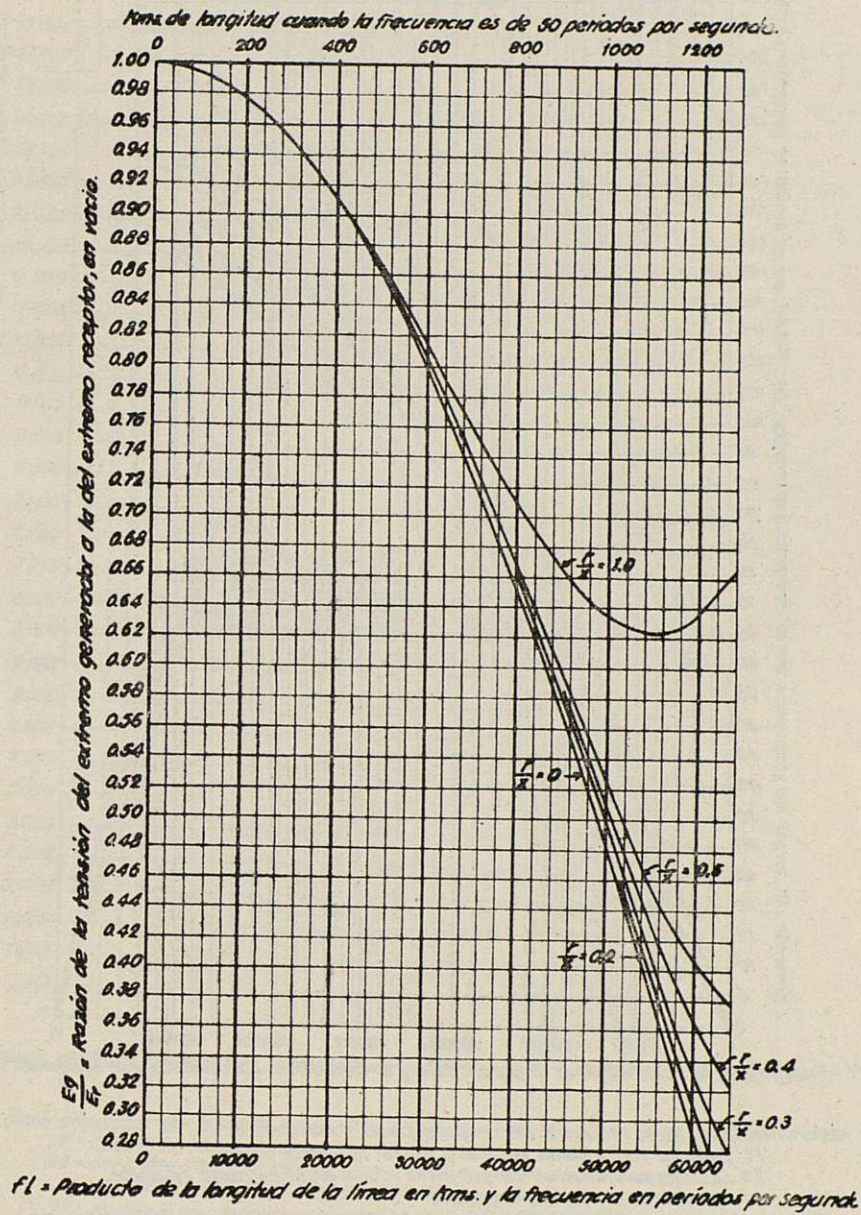
$$\alpha_1 = \alpha_1 \text{ (obtenido en gráf. 1 ó 2)} + \Delta \alpha_1 (1'16 \cdot 10^{-11} - LC)$$

$$\beta_1 = \beta_1 \text{ (obtenido en gráf. 1 ó 2)} + \Delta \beta_1 (1'16 \cdot 10^{-11} - LC)$$

$$\gamma_1 = \gamma_1 \text{ (obtenido en gráf. 1 ó 2)} + \Delta \gamma_1 (1'16 \cdot 10^{-11} - LC)$$



#### GRAFICO 4.- TRANSMISION DE LA TENSION EN VACIO

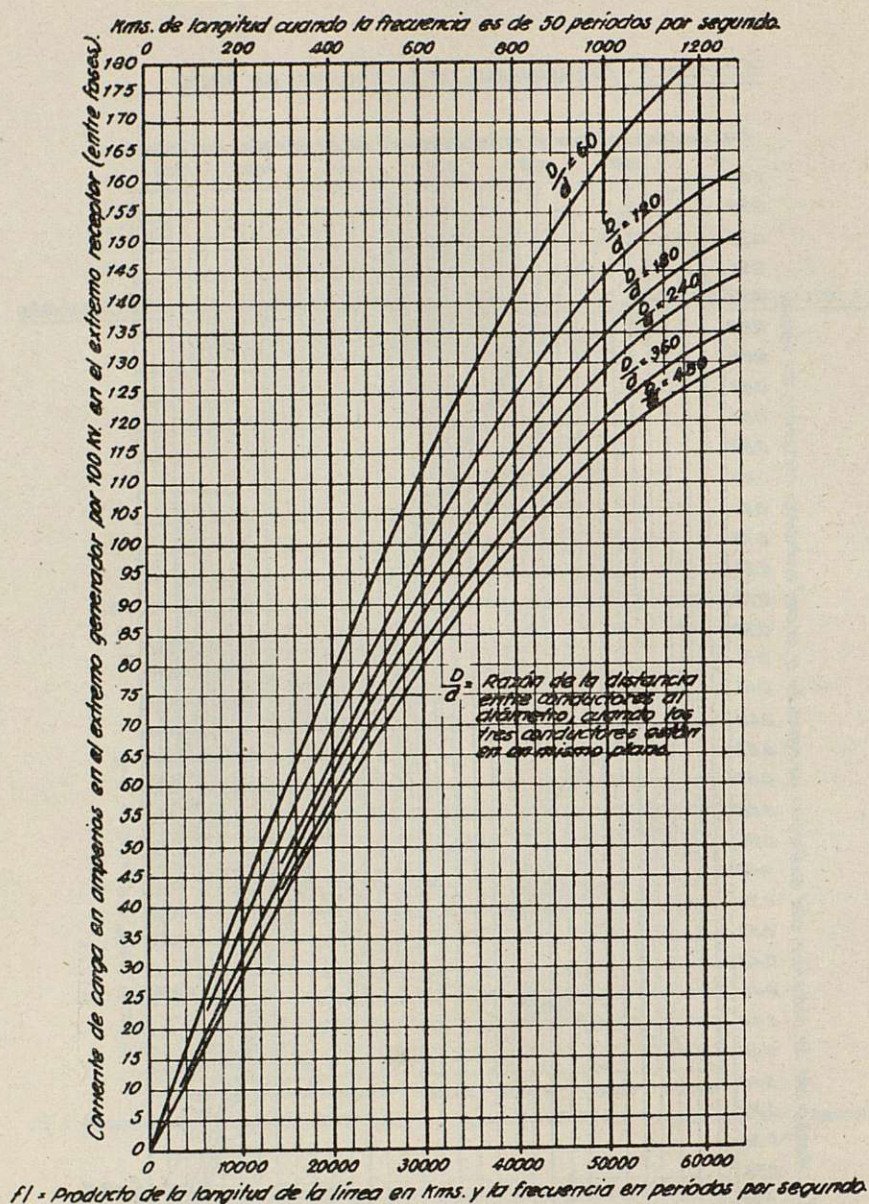


La determinación de la razón  $\frac{E_g}{E_r}$  comprende:

- 1ª - Calcular los valores de  $\frac{f}{x}$  y  $fl$  de la línea dada.
- 2ª - Leer sobre la curva correspondiente el valor de  $\frac{f}{x}$  encontrado.



### GRAFICO 5: CORRIENTE DE CARGA EN VACIO.

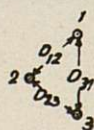


La determinación de la corriente de carga en vacío comprende:

- 1º Calcular los valores de  $\frac{D}{d}$  y  $Fl$  de la línea dada.
- 2º Leer la corriente de carga, para 100 KV. en el extremo receptor, sobre la curva correspondiente.
- 3º Multiplicar esta corriente por  $\left( \frac{\text{KV. en el extremo receptor entre fases}}{100} \right)$

NOTA: Si la línea no tiene los tres conductores en un mismo plano debe tomarse para  $D$  el siguiente valor:

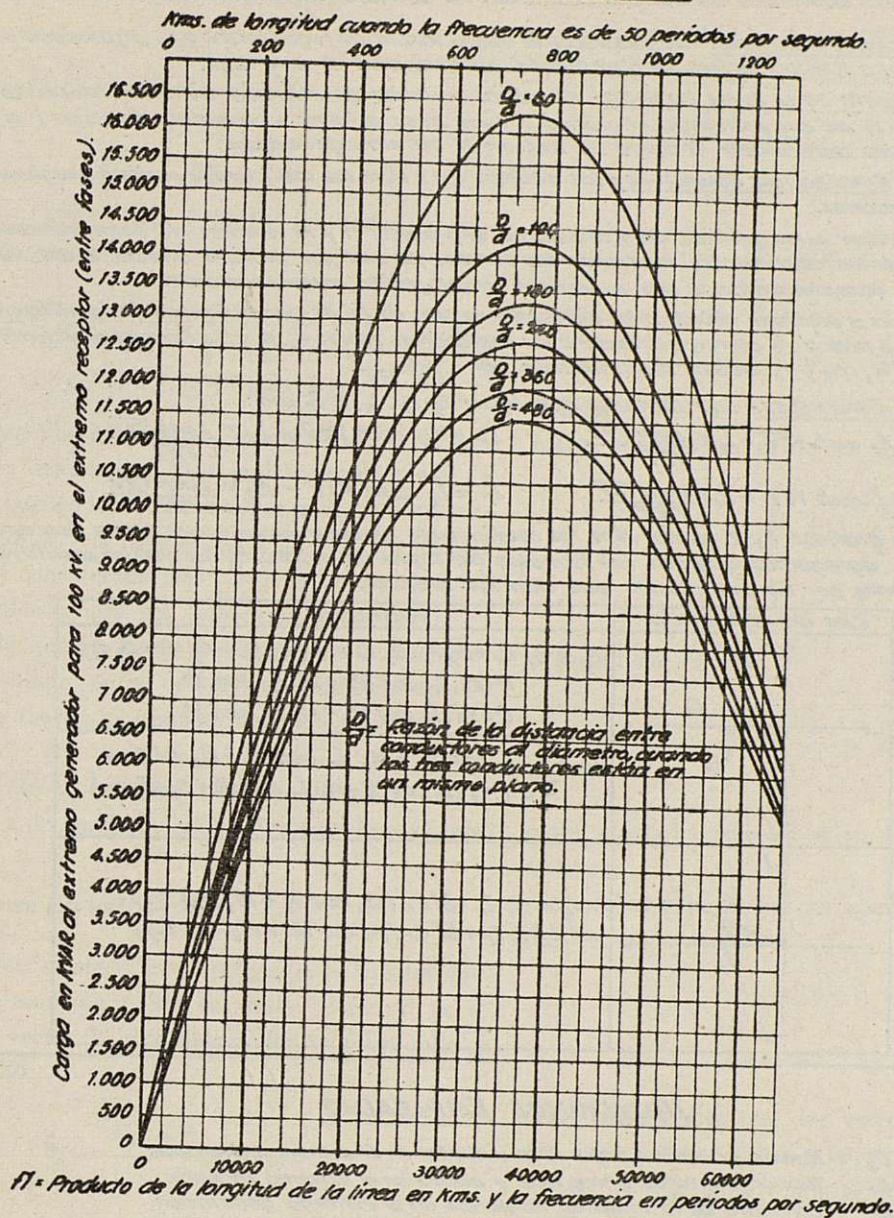
$$D = \frac{1}{1.26} \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}$$



Siendo  $D_{12}$ ,  $D_{23}$ ,  $D_{31}$  las distancias entre los conductores.



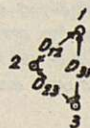
# **GRAFICO 6: CARGA EN KVAR EN VACIO**



La determinación de los KVA. en el extremo generador en vacío comprende:

- 1º - Calcular los valores  $D/d$  y  $f l$  de la línea dada.
- 2º - Leer los KVAR de carga, para 100 KV. en el extremo receptor, sobre la curva correspondiente.
- 3º - Multiplicar esta carga en KVA. por  $\left( \frac{\text{KV. en el extremo receptor, entre fases}}{100} \right)^2$

NOTA: Si la línea no tiene los tres conductores en un mismo plano debe tomarse para  $D$  el siguiente valor:  $D = \frac{1}{1.25} \sqrt{D_{12} D_{23} D_{31}}$



Siendo  $D_{12}$ ,  $D_{23}$ ,  $D_{31}$  las distancias entre los conductores.



## GRÁFICOS Y FORMULAS PARA LARGAS LINEAS DE TRANSMISION

(Gráficos extraídos de General Electric Review de Mayo 1926, pag. 321-322)

**SIMPLIFICACIONES ADMITIDAS.**— Se desprecia la conductancia de fugas (valor  $g$ ) y el producto  $LC$  se toma igual a  $1.16 \cdot 10^{-11}$  en (seg/km)<sup>2</sup>, ya que  $LC$  difiere poco de este valor.

**FUNCIONAMIENTO DE LA LINEA EN VAGO.**— El gráfico 4 indica la relación entre las tensiones eficaces  $E_g$  y  $E_r$  de sus extremos, el gráfico 5 sirve para obtener la corriente de carga y el gráfico 6 para determinar la carga en KVA. en el extremo generador.

**FUNCIONES HIPERBOLICAS COMPLEJAS.**— Los gráficos 1 y 2 dan los coeficientes reales e imaginarios de estas funciones.

Antes de utilizar estos gráficos debe calcularse el producto  $fl$  y la relación  $r/x$ , encontrándose los valores de los coeficientes mediante las curvas, ya sea por lectura directa o con las operaciones complementarias que se indican en el gráfico correspondiente.

La corrección a efectuar debido a los diferentes valores de  $LC$  es generalmente insignificante y el gráfico 3 indica la correspondiente a los coeficientes reales  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  y  $T_1$ . Para los coeficientes imaginarios  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$  y  $T_2$  deben multiplicarse por  $\frac{LC}{1.16 \cdot 10^{-11}}$ .

**FORMULAS GENERALES.**— Las fórmulas que ligan  $E_g$ ,  $E_r$ ,  $I_g$  e  $I_r$  son:

$$\begin{aligned} \dot{E}_g &= \dot{E}_r \cosh VZY + \dot{I}_r Z \frac{\sinh VZY}{VZY} & \dot{E}_r &= \dot{E}_g \cosh VZY - \dot{I}_g Z \frac{\sinh VZY}{VZY} \\ \dot{I}_g &= \dot{I}_r \cosh VZY + \dot{E}_r Y \frac{\sinh VZY}{VZY} & \dot{I}_r &= \dot{I}_g \cosh VZY - \dot{E}_g Y \frac{\sinh VZY}{VZY} \end{aligned}$$

Como los gráficos 1 y 2 ya nos dan los coeficientes reales e imaginarios de las funciones hiperbólicas, agregamos además las fórmulas del siguiente cuadro, en las que se sustituyen estas funciones por los coeficientes que dan los gráficos.

Ejes de referencia	Fórmulas
	$\begin{aligned} \dot{E}_g &= \alpha_1 E_r + \beta_1 P - \beta_2 Q + j(\alpha_2 E_r + \beta_2 P + \beta_1 Q) \\ P &= r l I_r \cos \varphi_r + x l I_r \sin \varphi_r \\ Q &= x l I_r \cos \varphi_r - r l I_r \sin \varphi_r \end{aligned}$
	$\begin{aligned} \dot{I}_g &= \alpha_1 I_r \cos \varphi_r + \alpha_2 I_r \sin \varphi_r - \beta_2 b l E_r + \\ &+ j(\alpha_2 I_r \cos \varphi_r - \alpha_1 I_r \sin \varphi_r + \beta_1 b l E_r) \end{aligned}$
	$\begin{aligned} \dot{I}_g &= \alpha_1 I_r - b l E_r (\beta_2 \cos \varphi_r + \beta_1 \sin \varphi_r) + \\ &+ j(\alpha_2 I_r + b l E_r (\beta_1 \cos \varphi_r + \beta_2 \sin \varphi_r)) \end{aligned}$

### NOTACIONES EMPLEADAS

- $E_g$  = Tensión en voltios entre fase y neutro en el extremo generador.  
 $E_r$  = Tensión en voltios entre fase y neutro en el extremo receptor.  
 $I_g$  = Corriente de la línea en Amperios en el extremo generador.  
 $I_r$  = Corriente de la línea en Amperios en el extremo receptor.  
 $\varphi_r$  = Ángulo de desfase en retraso de  $I_r$  con respecto a  $E_r$ .  
 $Z = l(r + jx)$  = Impedancia total de un conductor de la línea en Ohmios.  
 $Y = l(g + jb)$  = Admitancia total de un conductor de la línea en 1/Ohmios.  
 $f$  = Frecuencia en periodos por segundo.  
 $l$  = Longitud de la línea en kms.  
 $r$  = Resistencia por km. de un conductor de la línea, en  $\Omega$ /km.  
 $x = 2 \pi f L$  Reactancia por km. de un conductor de la línea, en  $\Omega$ /km.  
 $g$  = Conductancia de fugas de la línea, que se supone nula.  
 $b = 2 \pi f C$  = Susceptancia de capacidad por km. de línea entre fase y neutro en  $\frac{1/\Omega}{\text{km.}}$ .  
 $L$  = Inductancia por km. de línea entre fase y neutro, en henrys/km.  
 $C$  = Capacidad por km. de línea entre fase y neutro, en faradios/km.  
 $D$  = Distancia entre conductores, cuando están los tres en un mismo plano en cm.  
 $d$  = Diámetro de los conductores en cm.  
 $j = \sqrt{-1}$   
 $\dot{E}_g, \dot{E}_r, \dot{I}_g, \dot{I}_r$  (con el punto encima) son precisamente los valores vectoriales.



Si, además de  $g = 0$ , despreciamos  $r$ , con objeto de simplificar, encontramos (según 124):

$$\dot{K} = j \omega \sqrt{LC} \quad (134)$$

que comparada con (126) da

$$\alpha = 0 \quad (135)$$

$$\beta = \omega \sqrt{LC} \quad (136)$$

Según las (132), (133) y (118), las ondas se propagan a la velocidad:

$$\begin{aligned} v = \frac{\omega}{\beta} &= \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{1.16 \cdot 10^{-11}}} = \\ &= 2,94 \cdot 10^8 + \cong 3 \cdot 10^8 \text{ Km/sg.} \end{aligned} \quad (137)$$

aproximadamente igual a la propagación de la luz.

El mismo resultado (131) podría encontrarse directamente partiendo de las ecuaciones entre derivadas parciales que sirven para deducir la (122) y (123); pero, hemos considerado más claro partir de las ecuaciones de Blondel por ser éstas muy conocidas.

A la onda que se dirige hacia el extremo receptor (primer sumando) se la denomina onda directa, y la que regresa (segundo sumando) se la llama onda reflejada.

Partiendo de la ecuación (123) en forma análoga, llegaríamos a un resultado correlativo para la corriente.

### c) Régimen característico.

Para que no exista la onda reflejada, es preciso que la B de la ecuación (131) sea nulo. Como B es el módulo del vector  $\vec{B}$ , éste deberá ser también nulo y (según la 129):

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \frac{\dot{U}_o - \dot{Z}_c \dot{I}_o}{2} = 0 \\ \dot{Z}_c &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} = \dot{Z}_o \end{aligned} \quad (138)$$

o sea, que la impedancia  $\dot{Z}_o$  de la carga en el extremo receptor debe ser igual a la característica  $\dot{Z}_c$  de la línea.

Este resultado está de acuerdo con la fórmula del coeficiente de reflexión de ondas en una línea en un punto de cambio de características.

$$\frac{Z_o - Z_c}{Z_o + Z_c}$$

el cual debe ser nulo, para que no haya onda reflejada.

Substituyendo el valor (138) de  $\dot{Z}_c$  en las ecuaciones generales (122) y (123), se halla:

$$\begin{aligned} \dot{U}_x &= \dot{U}_o \text{Ch } \dot{K}x + \dot{Z}_o \dot{I}_o \text{Sh } \dot{K}x = \\ &= (\text{Ch } \dot{K}x + \text{Sh } \dot{K}x) \dot{U}_o \\ \dot{I}_x &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{Z}_o} \text{Sh } \dot{K}x + \dot{I}_o \text{Ch } \dot{K}x = \\ &= (\text{Ch } \dot{K}x + \text{Sh } \dot{K}x) \dot{I}_o \end{aligned} \quad (139)$$

Expresando las funciones hiperbólicas por exponenciales, resultan las siguientes ecuaciones del régimen:

$$\begin{aligned} \dot{U}_x &= \dot{U}_o e^{\dot{K}x} \\ \dot{I}_x &= \dot{I}_o e^{\dot{K}x} \end{aligned} \quad (140)$$

y se obtiene de ellas

$$\frac{\dot{U}_x}{\dot{I}_x} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o} = \dot{Z}_o = \dot{Z}_c \quad (141)$$

o sea, que la impedancia es constante a lo largo de toda la línea.

Substituyendo  $\dot{K}$  por su compleja (126), las (140) pueden expresarse:

$$\begin{aligned} \dot{U}_x &= e^{\alpha x} \dot{U}_o e^{j\beta x} \\ \dot{I}_x &= e^{\alpha x} \dot{I}_o e^{j\beta x} \end{aligned} \quad (142)$$

Esto nos indica que, los vectores tensión e intensidad experimentan giros y amortiguamientos iguales a lo largo de la línea y que el ángulo de giro es proporcional a la longitud de la línea.

Si admitimos  $g = 0$  y despreciable el valor de  $r$ , resulta  $\alpha = 0$  (según las 124, 135 y 136), y las ecuaciones del régimen (142) quedan simplificadas en

$$\begin{aligned} \dot{U}_x &= \dot{U}_o e^{j\beta x} = \dot{U}_o e^{j\phi} \\ \dot{I}_x &= \dot{I}_o e^{j\beta x} = \dot{I}_o e^{j\phi} \end{aligned} \quad (143)$$

Según la (137), y considerando la frecuencia de 50 per./seg. ( $\omega = 2\pi \cdot 50$ ), resulta:

$$\beta = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi \cdot 50}{300.000} = \frac{2\pi}{6.000} \text{ radianes/Km.} \quad (144)$$



y expresando  $x$  en Km.

$$\phi = 2\pi = \frac{x}{6.000} \text{ radianes} \quad (145)$$

Midiendo los ángulos en grados, estas fórmulas se convierten en:

$$\beta = \frac{360}{6.000} = \frac{6}{100} \text{ grados/Km.} \quad (146)$$

o sea un giro de 6 grados por 100 Km., resultando

$$\phi = \frac{6}{100} x \text{ grados} \quad (147)$$

Para una línea sin pérdidas, la (125) se simplifica en

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (148)$$

y la carga característica es de factor de potencia unidad, cuya potencia por fase es

$$U_o I_o = \frac{U_o^2}{Z_c}$$

Si pasamos a representar por  $U_o$  la tensión entre fases, la potencia característica en trifásico será

$$P_c = \frac{U_o^2}{Z_c} \quad (149)$$

El valor de  $Z_c$  varía poco de una línea a otra, si lo consideramos de 375 ohmios y si tomamos la tensión en kv. y la potencia en kw., se encuentra

$$P_c = 2,67 U_o^2 \quad (150)$$

Así, la carga característica de una línea de 110 kw. es de unos 32.000 kw.

#### d) Representación por cuadripolos.

Sabido es que toda línea o cualquiera combinación de impedancias y admitancias puede representarse por un cuadripolo, cuyas ecuaciones generales son:

$$\dot{U}_1 = \dot{A} \dot{U}_o + \dot{B} \dot{I}_o \quad (151)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{C} \dot{U}_o + \dot{D} \dot{I}_o$$

Las cuatro constantes  $\dot{A}$ ,  $\dot{B}$ ,  $\dot{C}$  y  $\dot{D}$  o coeficientes del cuadripolo cumplen con la condición

$$\begin{vmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{vmatrix} = \dot{A} \dot{D} - \dot{B} \dot{C} = 1 \quad (152)$$

por lo que el cuadripolo queda determinado al conocer tres de ellos.

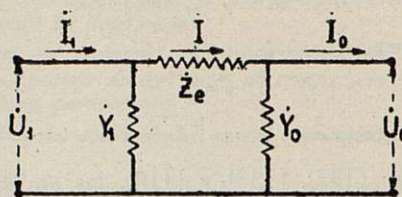


Fig. 36

Si tratamos de expresar el conocido círculo en  $\pi$  (fig. 36) por un cuadripolo, encontramos:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_o + \dot{Z}_e \dot{I} \\ \dot{I}_1 &= \dot{I} + \dot{Y}_1 \dot{U}_1 \\ \dot{I} &= \dot{I}_o + \dot{Y}_o \dot{U}_o \end{aligned} \quad (153)$$

y eliminando  $\dot{I}$

$$\dot{U}_1 = (1 + \dot{Z}_e \dot{Y}_o) \dot{U}_o + \dot{Z}_e \dot{I}_o \quad (154)$$

$$\dot{I}_1 = (\dot{Y}_o + \dot{Y}_1 + \dot{Z}_e \dot{Y}_o \dot{Y}_1) \dot{U}_o + (1 + \dot{Z}_e \dot{Y}_1) \dot{I}_o$$

con lo que queda representado el cuadripolo. Sus coeficientes valen (comparando 154 y 151):

$$\begin{aligned} \dot{A} &= 1 + \dot{Z}_e \dot{Y}_o \\ \dot{B} &= \dot{Z}_e \\ \dot{C} &= \dot{Y}_o + \dot{Y}_1 + \dot{Z}_e \dot{Y}_o \dot{Y}_1 \\ \dot{D} &= 1 + \dot{Z}_e \dot{Y}_1 \end{aligned} \quad (155)$$

Recíprocamente, todo cuadripolo puede substituirse por un circuito en  $\pi$  equivalente, cuyas tres constantes  $\dot{Z}_e$ ,  $\dot{Y}_o$ ,  $\dot{Y}_1$  vienen determinadas en función de los coeficientes del cuadripolo por medio del sistema (155), resultando:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_e &= \dot{B} \\ \dot{Y}_o &= \frac{\dot{A} - 1}{\dot{B}} \\ \dot{Y}_1 &= \frac{\dot{D} - 1}{\dot{B}} \end{aligned} \quad (156)$$

Correlativas transformaciones podríamos encontrar



para el denominado circuito en T; pero no tiene interés para nuestros propósitos (Apartado h).

En todo cuadripolo hay cuatro variantes vectoriales ( $U_0, U_1, \dot{I}_0, \dot{I}_1$ ), y las dos relaciones (151), y quedan dos vectores independientes. Para el estudio de la estabilidad, tiene interés considerar que éstos sean precisamente  $\dot{U}_0$  y  $\dot{U}_1$ . Expresando, por lo tanto,  $\dot{I}_0, \dot{I}_1$  en función de ellos, teniendo en cuenta las (151) y (152), se encuentra.

$$\begin{aligned} \dot{I}_0 &= \frac{U_1 - \dot{A} U_0}{\dot{B}} \\ \dot{I}_1 &= \frac{\dot{D} \dot{U}_1 - U_0}{\dot{B}} \end{aligned} \quad (157)$$

e) *Cuadripolo que representa una línea.*

Según las ecuaciones (110) y (151), los coeficientes del cuadripolo de una línea son:

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \dot{D} = Ch \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}} \\ \dot{B} &= \dot{Z} \frac{Sh \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}}{\sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}} \\ \dot{C} &= \dot{Y} \frac{Sh \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}}{\sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}} \end{aligned} \quad (158)$$

Da lugar al denominado cuadripolo simétrico, por ser iguales los coeficientes  $\dot{A}$  y  $\dot{D}$ ; el cual sólo tiene dos coeficientes independientes por cumplirse la relación (152) general de todo cuadripolo.

Para la determinación de estos coeficientes, es preciso hallar el valor de funciones hiperbólicas de variable compleja. Esto se consigue empleando tablas trigonométricas e hiperbólicas, teniendo en cuenta que:

$$\begin{aligned} Sh(a + jb) &= Sha \cos b + j Cha \operatorname{sen} b \\ Ch(a + jb) &= Cha \cos b + j Sha \operatorname{sen} b \end{aligned} \quad (159)$$

Los gráficos 1 y 2 dan directamente los coeficientes de las complejas resultantes para líneas de cualquier longitud.

Estos cálculos pueden simplificarse substituyendo las

funciones hiperbólicas por sus desarrollos en serie (ya citado):

$$Ch \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}} = 1 + \frac{\dot{Z} \dot{Y}}{2!} + \frac{\dot{Z}^2 \dot{Y}^2}{4!} + \dots \dots \quad (160)$$

$$\frac{Sh \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}}{\sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}} = 1 + \frac{\dot{Z} \dot{Y}}{3!} + \frac{\dot{Z}^2 \dot{Y}^2}{5!} + \dots \dots \quad (161)$$

tomando solamente los primeros términos.

Partiendo de la (121) pueden calcularse los términos de estas series, las que resultan ser de una excelente convergencia. Para precisar, supongamos líneas de unos 75 mm. cuadrados de sección de cobre, siendo

$$\frac{r}{x} = \frac{1}{1,73} = 0,578$$

lo que da

$$\dot{Z} \dot{Y} = (2,66 \cdot 10^{-10} j - 4,58 \cdot 10^{-10}) f^2 l^2$$

cuyo módulo es

$$Z Y = 5,30 f^2 l^2 \cdot 10^{-10} \quad (162)$$

Las curvas de la fig. 37 dan los módulos de los primeros términos de las series (160 y 161), para las líneas de 50 períodos por segundo, y alrededor de 75 milímetros cuadrados de sección de cobre. Para largas líneas es frecuente emplear mayores secciones. En tal caso estos módulos serán ligeramente inferiores; pues en el caso límite de  $r = 0$ , el coeficiente 5,30 de la (162) se convertiría en 4,58.

Si consideramos despreciables los términos de las

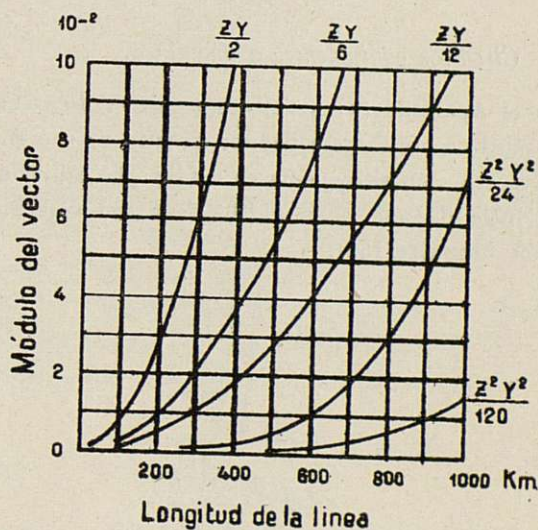


Fig. 37



series cuyos módulos sean inferiores a una centésima, resulta, según las curvas de la fig. 37:

1.º Para líneas entre 200 y 600 Km. de longitud sólo podrán despreciarse los terceros términos de las series (160 y 161), y queda el cuadripolo reducido a

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \left(1 + \frac{\dot{Z} \dot{Y}}{2}\right) \dot{U}_0 + \left(1 + \frac{\dot{Z} \dot{Y}}{6}\right) \dot{Z} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 &= \left(1 + \frac{\dot{Z} \dot{Y}}{6}\right) \dot{Y} \dot{U}_0 + \left(1 + \frac{\dot{Z} \dot{Y}}{2}\right) \dot{I}_0\end{aligned}\quad (163)$$

2.º Para líneas de 100 a 200 Km. puede despreciarse, además, el segundo término de la serie (161) y las ecuaciones del cuadripolo se reducen a

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \left(1 + \frac{\dot{Z} \dot{Y}}{2}\right) \dot{U}_0 + \dot{Z} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 &= \dot{Y} \dot{U}_0 + \left(1 + \frac{\dot{Z} \dot{Y}}{2}\right) \dot{I}_0\end{aligned}\quad (164)$$

Estas ecuaciones equivalen a tomar las características como localizadas, determinando la tensión por el circuito equivalente en  $\pi$ , y la corriente por el equivalente en T.

3.º Para líneas de longitud igual o inferior a 100 Km. también puede despreciarse el segundo término de la serie (160), y llega la simplificación a las ecuaciones:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{U}_0 + \dot{Z} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 &= \dot{Y} \dot{U}_0 + \dot{I}_0\end{aligned}\quad (165)$$

#### f) Circuitos equivalentes a una línea.

En el Apartado (d) se ha visto cómo todo cuadripolo puede representarse por un circuito en  $\pi$  o en T equivalente. Así, el esquema en  $\pi$  (fig. 36) equivale al cuadripolo de una línea (110), tiene por constantes (según fórmulas 156):

$$\dot{Z}_e = \dot{Z} \frac{Sh \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}}{\sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}} \quad (166)$$

$$\dot{Y}_e = \dot{Y}_1 = \frac{Ch \sqrt{\dot{Z} \dot{Y} - 1}}{\dot{Z} \frac{Sh \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}}{\sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}}} \quad (167)$$

Recordando que

$$\frac{Ch \sqrt{\dot{Z} \dot{Y} - 1}}{Sh \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}} = Th \frac{\sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}}{2}$$

la (167), queda transformada en:

$$\dot{Y}_e = \dot{Y}_1 = \frac{\dot{Y}}{2} \frac{Th \frac{1}{2} \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}}{\frac{1}{2} \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}} \quad (168)$$

También podría representarse la línea por el cir-

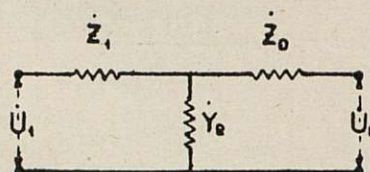


Fig. 38

cuito equivalente en T (fig. 38), y se encuentra, correlativamente:

$$\dot{Y}_e = \dot{C} = \dot{Y} \frac{Sh \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}}{\sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}} \quad (169)$$

$$\dot{Z}_e = \dot{Z}_1 = \frac{\dot{A} - 1}{\dot{C}} = \frac{\dot{Z}}{2} \frac{Th \frac{1}{2} \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}}{\frac{1}{2} \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}}$$

En estas fórmulas (166, 168 y 169) sólo figuran el seno y la tangente hiperbólicas, cuyos desarrollos en serie son el (161) y el siguiente:

$$\frac{Th \frac{2}{1} \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}}{\frac{1}{2} \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}}} = 1 - \frac{\dot{Z} \dot{Y}}{12} + \frac{\dot{Z}^2 \dot{Y}^2}{120} - \dots \quad (170)$$

Si, para simplificar, consideramos despreciables aquellos términos cuyos módulos sean inferiores a una centésima, según las curvas de la fig. 37, la representación de una línea por el circuito equivalente en  $\pi$  o en T queda simplificada como sigue:

1.º Para líneas entre 300 y 600 Km., sólo se podrán despreciar los terceros términos de las se-



ries (161 y 170), y las fórmulas (166, 168 y 169) quedan reducidas a

$$\begin{aligned}\dot{Z}_e &= \dot{Z} \left( 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{6} \right) \\ \dot{Y}_o &= \dot{Y}_1 = \frac{\dot{Y}}{2} \left( 1 - \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{12} \right)\end{aligned}\quad (171)$$

correspondientes al circuito equivalen en  $\pi$  y

$$\begin{aligned}\dot{Y}_e &= \dot{Y} \left( 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{6} \right) \\ \dot{Z}_o &= \dot{Z}_1 = \frac{\dot{Z}}{2} \left( 1 - \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{12} \right)\end{aligned}\quad (172)$$

para el circuito equivalente en T.

2.º Para líneas de 200 a 300 Km., pueden simplificarse las fórmulas (171 y 172) despreciando el término  $\dot{Z}\dot{Y}/12$ .

3.º Para líneas de longitud igual o inferior a 200 Km., puede despreciarse, además, el término  $\dot{Z}\dot{Y}/6$ , quedando las constantes de los circuitos equivalentes reducidas a

$$\begin{aligned}\dot{Z}_e &= \dot{Z} \\ \dot{Y}_o &= \dot{Y}_1 = \frac{\dot{Y}}{2}\end{aligned}\quad (173)$$

para el circuito en  $\pi$

$$\begin{aligned}\dot{Y}_e &= \dot{Y} \\ \dot{Z}_o &= \dot{Z}_1 = \frac{\dot{Z}}{2}\end{aligned}\quad (174)$$

para el circuito en T.

Estas fórmulas demuestran que la simplificación equivale a suponer las características localizadas.

g) *Expresiones generales de las potencias de un cuadripolo.*

Para concretar, consideramos positivas: las reactancias inductivas ( $x = \omega L$ ), las susceptancias de capacidad ( $b = \omega C$ ) y las potencias reactivas de inducción Q. De esta forma, en los ejes de referencia que empleamos (fig. 39), coinciden las  $r$  y  $g$  positivas con

el eje  $+1$ , y las  $x$  y  $b$  positivas con el eje  $+j$ . La potencia compleja  $\dot{P}_a = P + jQ$  (fig. 40) es el

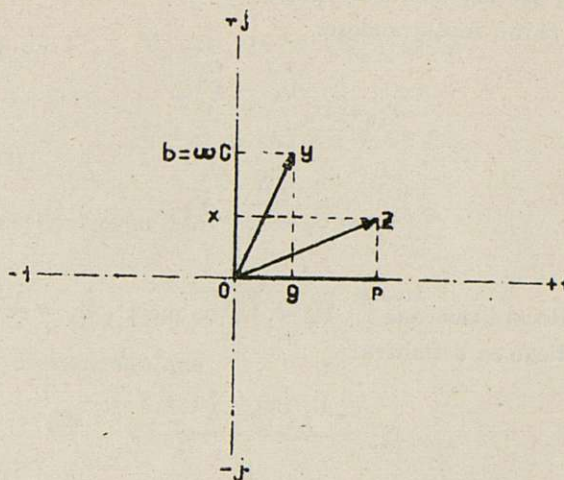


Fig. 39

producto vectorial de la tensión  $\dot{U}$  por el vector  $\dot{I}$  conjugado de la corriente, y los coeficientes real e imaginario  $P$  y  $Q$  son, respectivamente, las potencias activas y reactivas.

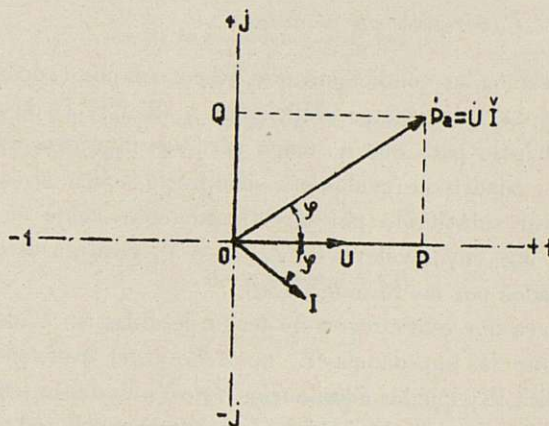


Fig. 40

El símbolo  $U$  indica, en general, tensiones entre una fase y neutro, resultando en las fórmulas que se expondrán potencias en una sola fase.

Así, las potencias activas y reactivas en los extremos de un cuadripolo pueden representarse por fórmulas simbólicas que nos den las potencias complejas:

$$\begin{aligned}\dot{P}_{a0} &= \dot{U}_0 \dot{I}_0 \\ \dot{P}_{a1} &= \dot{U}_1 \dot{I}_1\end{aligned}\quad (175)$$

En los estudios de estabilidad, conviene expresar



las potencias en función de las tensiones en los extremos. Para conseguirlo, basta conjugar los vectores  $\dot{U}_0$  e  $\dot{U}_1$  que nos dan las fórmulas (157), y substituirlos en las (175), encontrándose:

$$\begin{aligned}\dot{P}_{ao} &= \dot{U}_0 \frac{\dot{U}_1 - \dot{A} \dot{U}_0}{\dot{B}} \\ \dot{P}_{a1} &= \dot{U}_1 \frac{\dot{D} \dot{U}_1 - \dot{U}_0}{\dot{B}}\end{aligned}\quad (176)$$

Recordando que  $\dot{U}_0 \dot{U}_0 = U_0^2$  y que  $\dot{U}_1 \dot{U}_1 = U_1^2$ , se tiene en definitiva:

$$\begin{aligned}\dot{P}_{ao} &= \frac{\dot{U}_0 \dot{U}_1 - \dot{A} U_0^2}{\dot{B}} \\ \dot{P}_{a1} &= \frac{\dot{D} U_1^2 - \dot{U}_0 \dot{U}_1}{\dot{B}}\end{aligned}\quad (177)$$

que son las expresiones generales de la potencia en los extremos de cualquier cuadripolo.

#### h) Cuadripolo sin pérdidas.

Veamos las condiciones que deben cumplir (además de la 152), los cuatro coeficientes  $\dot{A}$ ,  $\dot{B}$ ,  $\dot{C}$  y  $\dot{D}$  de un cuadripolo para que no tenga pérdidas interiores.

Un cuadripolo cualquiera siempre lo podemos considerar substituido por un circuito equivalente en  $\pi$  (fig. 36), cuyos valores de  $\dot{Z}_e$ ,  $\dot{Y}_0$  e  $\dot{Y}_1$  vendrán determinados por las fórmulas 156).

Para que este circuito no tenga pérdidas, es evidente que la impedancia  $\dot{Z}_e$  no debe tener resistencia óhmica  $R$  y que las admitancias  $\dot{Y}_0$  e  $\dot{Y}_1$  no deben tener conductancias  $G$ , de donde resulta, como condición necesaria y suficiente, que

$$\dot{Z}_e = jX \quad \dot{Y}_0 = jB_0 \quad \dot{Y}_1 = jB_1 \quad (178)$$

Substituyendo estos valores en las (155) se obtienen los coeficientes del cuadripolo

$$\begin{aligned}\dot{A} &= 1 - B_0 X \\ \dot{B} &= jX \\ \dot{C} &= -j(B_0 B_1 X - B_0 - B_1) \\ \dot{D} &= 1 - B_1 X\end{aligned}\quad (179)$$

los cuales son de la forma

$$\begin{aligned}\dot{A} &= A \\ \dot{B} &= jB \\ \dot{C} &= -jC \\ \dot{D} &= D\end{aligned}\quad (180)$$

siendo  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  los cuatro módulos respectivos.

Como estos cuatro coeficientes deben cumplir con la condición (152), basta que se verifiquen tres cualesquiera de las (180) para que se cumpla la cuarta.

Si ahora aplicamos las expresiones generales de la potencia (177) a un cuadripolo sin pérdidas, se halla (según las 180):

$$\begin{aligned}\dot{P}_{ao} &= \frac{\dot{U}_0 \dot{U}_1 - A U_0^2}{-jB} = \frac{j \dot{U}_0 \dot{U}_1 - j A U_0^2}{B} \\ \dot{P}_{a1} &= \frac{D U_1^2 - \dot{U}_0 \dot{U}_1}{-jB} = \frac{j D U_1^2 - j \dot{U}_0 \dot{U}_1}{B}\end{aligned}\quad (181)$$

Haciendo coincidir para simplificar el eje real positivo con el vector  $\dot{U}_0$  y designando por  $\delta$  el ángulo entre  $\dot{U}_0$  y  $\dot{U}_1$ , se tiene:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= U_1 \cos \delta + j U_1 \sin \delta \\ \dot{U}_1 &= U_1 \cos \delta - j U_1 \sin \delta\end{aligned}\quad (182)$$

que substituídas en las (181) se encuentran expresiones de la forma

$$\begin{aligned}\dot{P}_{ao} &= P_o + Q_o \\ \dot{P}_{a1} &= P_1 + j Q_1\end{aligned}\quad (183)$$

siendo

$$P_o = P_1 = \frac{U_o U_1}{B} \sin \delta \quad (184)$$

$$Q_o = \frac{U_o U_1}{B} \cos \delta - \frac{A}{B} U_o^2 \quad (185)$$

$$Q_1 = \frac{D}{B} U_1^2 - \frac{U_o U_1}{B} \cos \delta \quad (186)$$

que son las expresiones de la potencia activa y reactiva en los extremos de un cuadripolo sin pérdidas.



Las fórmulas (185) y (186) pueden transformarse en las siguientes de más fácil interpretación.

$$Q_0 = \frac{1-A}{B} U_0^2 - \frac{U_0^2}{B} + \frac{U_0 U_1}{B} \cos \delta \quad (187)$$

$$Q_1 = -\frac{1-D}{B} U_1^2 + \frac{U_1^2}{B} - \frac{U_0 U_1}{B} \cos \delta \quad (188)$$

La potencia reactiva generada por el cuadripolo será:

$$Q_0 - Q_1 = \frac{1-A}{B} U_0^2 + \frac{1-D}{B} U_1^2 - \frac{U_0^2 + U_1^2 - 2 U_0 U_1 \cos \delta}{B} \quad (189)$$

Para interpretar estos tres términos, basta reemplazar el cuadripolo por el circuito  $\pi$  equivalente (figura 36), substituyendo A, B, y D por los módulos de

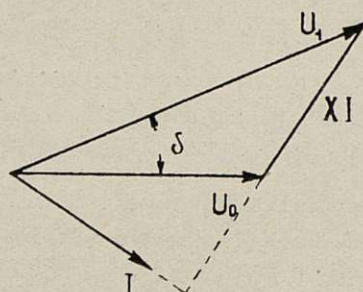


Fig. 41

(179) y observar que  $U_0$ ,  $U_1$  y  $XI$  forman el triángulo de la fig. 41:

$$Q_0 - Q_1 = B_0 U_0^2 + B_1 U_1^2 - XI^2 \quad (190)$$

la que indica que los dos primeros términos es la potencia reactiva que dan  $\dot{Y}_0$ ,  $\dot{Y}_1$  y el tercero la absorbida por  $\dot{Z}_e$ .

En las fórmulas de 184 a 189, si las tensiones  $U$  se toman entre fases, se obtienen las potencias trifásicas.

#### i) Línea sin pérdidas.

En las líneas de transmisión se considera  $g = 0$ , y, para simplificar, muchas veces, se desprecia la resistencia óhmica ( $r = 0$ ), resultando (según las 124, 125 y 126):

$$\dot{K} = j\beta = j\omega \sqrt{LC} \quad (191)$$

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \dot{Z}_c \quad (192)$$

Entonces, al aplicar las (122) y (123) en una línea de  $l$  Km. de longitud, se encuentra:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_0 \operatorname{Ch} j\phi + \dot{Z}_c \dot{I}_0 \operatorname{Sh} j\phi \\ \dot{I}_1 &= \frac{\dot{U}_0}{\dot{Z}_c} \operatorname{Sh} j\phi + \dot{I}_0 \operatorname{Ch} j\phi \end{aligned} \quad (193)$$

siendo (según 145)

$$\phi = 2\pi \frac{l}{6.000} \text{ radianes} \quad (194)$$

Recordando que

$$\begin{aligned} \operatorname{Ch} j\phi &= \frac{e^{j\phi} + e^{-j\phi}}{2} = \cos \phi \\ \operatorname{Sh} j\phi &= \frac{e^{j\phi} - e^{-j\phi}}{2} = j \sin \phi \end{aligned}$$

las (193) quedan transformadas en

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_0 \cos \phi + j \dot{Z}_c \dot{I}_0 \sin \phi \\ \dot{I}_1 &= j \frac{\dot{U}_0}{\dot{Z}_c} \sin \phi + \dot{I}_0 \cos \phi \end{aligned} \quad (195)$$

que son las ecuaciones de un cuadripolo cuyos coeficientes son:

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \cos \phi = A \\ \dot{B} &= j \dot{Z}_c \sin \phi = j B \\ \dot{D} &= \cos \phi = D \end{aligned} \quad (196)$$

Se puede comprobar que cumple con las condiciones (180) de un cuadripolo sin pérdidas.

Substituyendo estos valores en las (184, 185 y 186), se halla la potencia activa transmitida por la línea y las reactivas en sus dos extremos.

$$P_0 = P_1 = \frac{U_0 U_1}{\dot{Z}_c \sin \phi} \sin \delta \quad (197)$$

$$Q_0 = \frac{U_0 U_1}{\dot{Z}_c \sin \phi} \cos \delta - \frac{U_0^2}{\dot{Z}_c \operatorname{tg} \phi} \quad (198)$$

$$Q_1 = \frac{U_1^2}{\dot{Z}_c \operatorname{tg} \phi} - \frac{U_0 U_1}{\dot{Z}_c \sin \phi} \cos \phi \quad (199)$$



j) *Caso de una central con su línea de interconexión.*

Sea el caso ideal de una máquina (equivalente a una central) de f. e. m.  $\dot{E}$  y reactancia  $X$  que alimenta una línea de interconexión de tensiones  $U_1$  y  $\dot{U}_0$  en sus extremos (fig. 3). El extremo receptor está conectado a una red que suponemos de tensión  $\dot{U}_0$  constante.

La central es el cuadripolo siguiente:

$$\begin{aligned}\dot{E} &= \dot{U}_1 + jX\dot{I}_1 \\ \dot{I} &= \dot{I}_1\end{aligned}\quad (200)$$

cuyos coeficientes son, respectivamente, 1,  $jX$ , 0 y 1. La línea es el cuadripolo determinado por las ecuaciones (195).

Acoplando en serie estos dos cuadripolos, se obtiene el que sigue:

$$\dot{E} = \left( \cos \psi - \frac{X}{Z_c} \operatorname{sen} \psi \right) \dot{U}_0 + j \left( X \cos \psi + Z_c \operatorname{sen} \psi \right) \dot{I}_0 \quad (201)$$

$$\dot{I} = j \frac{\operatorname{sen} \psi}{Z_c} \dot{U}_0 + \dot{I}_0 \cos \psi$$

Como es lógico, sus coeficientes cumplen con la condición (180) de un cuadripolo sin pérdidas. Aplicándole las fórmulas (184 y 185), se hallan las siguientes potencias activa y reactiva en el extremo receptor:

$$\begin{aligned}P_o &= \frac{E U_0}{X \cos \psi + Z_c \operatorname{sen} \psi} \operatorname{sen} \delta \\ Q_o &= \frac{E U_0 \cos \delta}{X \cos \psi + Z_c \operatorname{sen} \psi} - \\ &\quad - \frac{Z_c \cos \psi - X \operatorname{sen} \psi}{X \cos \psi + Z_c \operatorname{sen} \psi} \frac{U_0^2}{Z_c}\end{aligned}\quad (202)$$

Es fácil transformar estas fórmulas, haciendo

$$\begin{aligned}X \cos \psi + Z_c \operatorname{sen} \psi &= M \operatorname{sen} (\psi + \alpha) \\ Z_c \cos \psi - X \operatorname{sen} \psi &= N \cos (\psi + \beta)\end{aligned}\quad (203)$$

Desarrollando  $\operatorname{sen} (\psi + \alpha)$  y  $\cos (\psi + \beta)$  e identificando, se encuentra fácilmente:

$$M = N = \sqrt{Z_c^2 + X^2} = \mu Z_c \quad (204)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \beta = \frac{X}{Z_c} \quad (205)$$

siendo

$$\mu = \sqrt{1 + \frac{X^2}{Z_c^2}} \quad (206)$$

El valor de  $Z_c$  es de unos 375 ohmios y el de  $X$  resulta muy inferior. En el ejemplo de las figs. 3, 4 y 5 (Apartado 11), se tiene:

$$X = 48 \Omega$$

$$Z_c = 375 \Omega$$

y se encuentra

$$\mu = 1,008$$

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,128 \quad (207)$$

$$\alpha = 7^\circ 20'$$

En definitiva, las (202) quedan transformadas en:

$$\begin{aligned}P_o &= \frac{E U_0}{\mu Z_c \operatorname{sen} (\psi + \alpha)} \operatorname{sen} \delta \\ Q_o &= \frac{E U_0 \cos \delta}{\mu Z_c \operatorname{sen} (\psi + \alpha)} - \frac{U_0^2}{Z_c \operatorname{tg} (\psi + \alpha)}\end{aligned}\quad (208)$$

Como  $X$  es siempre pequeño al lado de  $Z_c$ , se puede tomar  $\mu = 1$  y  $\alpha$  prácticamente despreciable al lado de  $\psi$ , y queda demostrado que en la práctica estas fórmulas (208) difieren poco de las (197 y 198).

## APÉNDICE II

### ESTUDIO ANALÍTICO DE UN REGULADOR DE VELOCIDAD

#### a) Factores que intervienen en el funcionamiento.

Los reguladores primarios tienen por objeto regular la velocidad de las máquinas, aprovechando la fuerza centrífuga de una o más masas giratorias, que, al desviarse de su posición de equilibrio, actúan sobre los mecanismos de regulación, variando la admisión de la turbina (Apartado 21).

Al presentarse una variación repentina de la carga, se produce un desequilibrio entre el par motor y el resistente de la máquina provocando una aceleración angular en su movimiento de rotación. Esto origina una desviación del regulador (fórmulas 21 y 23), que modifica el distribuidor o admisión de la turbina buscando el nuevo estado de equilibrio.



Los factores que intervienen en el fenómeno son los siguientes:

1.º La inercia de la máquina que, al presentarse la perturbación, relaciona el desequilibrio de los pares motor y resistente con la aceleración angular.

2.º La carga de la red varía con la frecuencia de la corriente generada y, por lo tanto, con la velocidad de la máquina; resultando que el par resistente de la misma varía con la velocidad.

3.º Al actuar el regulador sobre la admisión o distribuidor de la turbina, con más o menos rapidez, origina una sobrepresión o subpresión en la tubería o sistema de alimentación de la turbina, lo que provoca una modificación en el par motor de la máquina.

Para simplificar, despreciemos este efecto, admitiendo que la variación del par motor es proporcional a la desviación del regulador.

4.º Las características del regulador.

#### b) Efecto de la carga.

La carga  $P_r$  de la red experimenta una variación al variar la frecuencia  $f$ , es decir:

$$P_r = F(f) \quad (209)$$

La función  $F$  depende de la índole de la carga y para simplificar, admitiremos

$$P_r = K f^h \quad (210)$$

siendo  $K$  una constante de proporcionalidad y  $h$  un exponente que depende de la índole de la carga.

Admitiendo que, debido a los reguladores automáticos de excitación, la tensión permanece constante a pesar de variar la frecuencia, podríamos admitir para el exponente  $h$  los siguientes valores:

Para carga de alumbrado y calefacción....  $h = 0$

Para motores de par resistente constante...  $h = 1$

Para ventiladores .....  $h = 3$

Para grandes redes donde hay mezclada carga industrial de diversa índole con carga urbana, puede estimarse  $h = 2$ . En la red de la región catalana la experiencia ha ratificado aproximadamente este valor.

Teniendo en cuenta la proporcionalidad entre la ve-

locidad angular  $\omega$  de la máquina y la frecuencia  $f$ , la expresión de la carga  $P_r$  será igualmente de la forma

$$P_r = K \omega^h \quad (211)$$

El par resistente  $C_r$  de la máquina vendrá expresado por

$$C_r = \frac{P_r}{\omega} = K \omega^{h-1} \quad (212)$$

Si la máquina experimenta un incremento de velocidad  $\Delta'\omega$ , el par resistente experimentará otro  $\Delta'C_r$ , de modo que

$$C_r + \Delta'C_r = K (\omega + \Delta'\omega)^{h-1} \quad (213)$$

y dividiendo por la (212)

$$1 + \frac{\Delta'C_r}{C_r} = \left(1 + \frac{\Delta'\omega}{\omega}\right)^{h-1} \quad (214)$$

Empleando el sistema de unidades de tanto por uno, en el que cada magnitud viene medida en tanto por uno de su valor normal, esta ecuación (214) se transforma

$$1 + \Delta C_r = (1 + \Delta \omega)^{h-1} \quad (215)$$

en la que  $\Delta C_r$  y  $\Delta \omega$  son los incrementos medidos en tanto por uno.

Desarrollando el segundo miembro de esta ecuación (215) por el binomio de Newton

$$1 + \Delta C_r = 1 + (h-1) \Delta \omega + \frac{(h-1)(h-2)}{1.2} \Delta^2 \omega + \dots$$

y tomando solamente los dos primeros términos por admitir que  $\Delta \omega$  es una fracción pequeña de la unidad, resulta la proporcionalidad

$$\Delta C_r = H \Delta \omega \quad (216)$$

siendo

$$H = h - 1 \quad (217)$$

Lo que nos dice que: en todo incremento de velocidad el par resistente sufre otro de proporcionalidad, cuya constante de proporcionalidad depende de la índole de la carga.

#### c) Ecuación diferencial de la máquina.

En todo sistema mecánico dotado de movimiento, las relaciones entre las cantidades cinemáticas y las fuerzas o pares vienen ligadas por constantes que representan la inercia de las masas en movimiento. En nues-



tro caso, las masas mecánicas están dotadas solamente de movimiento de rotación, y existe, por lo tanto, una sola constante que representa el momento de inercia de la masa giratoria.

El valor numérico que mide esta constante de inercia depende del sistema de unidades adoptado; en los problemas prácticos de mecánica se emplea el llamado  $PD^2$ , por adaptarse al sistema de unidades práctico. En cambio, en los estudios de sistemas eléctricos de producción y distribución se acostumbra a medir cada magnitud en tanto por uno o por ciento de cierto valor tomado como base.

Designando por  $\omega_t$  la velocidad en el tiempo  $t$  y por  $C_m$  y  $C_r$  los pares motor y resistentes, la ecuación de movimiento de la máquina es de la forma

$$M \frac{d\omega}{dt} = C_m - C_r \quad (218)$$

en la que  $M$  la constante de inercia de la máquina. En el sistema de unidades de tanto por uno y tomando como base el funcionamiento normal a plena carga, esta constante  $M$  es el tiempo en segundos que tardaría la máquina en pararse completamente, partiendo de este funcionamiento normal, suponiendo que su par resistente permaneciera constante y nulo el motor.

El valor de  $M$  depende del tipo de máquina y está comprendido entre unos 3 y 10 segundos. Puede calcularse en función del  $PD^2$  y revoluciones por minuto ( $n$ ) de la máquina por la fórmula.

$$M = 2,74 \cdot 10^{-6} n^2 \frac{PD^2}{P_e} \quad (219)$$

el  $PD_2$  está expresado en  $m^2 \text{ Kg.}$  y  $P_e$  es la potencia de plena carga de la máquina en kw.

La deducción de esta fórmula (219), puede encontrarse en el Apéndice IV de nuestro trabajo «Estabilidad de la marcha en paralelo de las máquinas eléctricas sincrónicas».

Antes de iniciarse la perturbación, se tiene:

$$\omega_t = \omega \quad (220)$$

$$C_m = C_r = C \quad (221)$$

siendo  $\omega$  y  $C$  los valores constantes de velocidad y par de funcionamiento normal.

Al presentarse un incremento repentino de carga  $\Delta P_r$ , el par resistente sufrirá también su incremento del mismo valor  $\Delta P_r$  (por emplear el sistema de unidades de tanto por uno), lo que provocará un des-

equilibrio en la máquina que incrementará la velocidad en  $\Delta \omega$  y, por lo tanto, otro nuevo incremento del par resistente  $\Delta C_r$  (ecuación 216), resultando en el tiempo  $t$  de iniciada la perturbación:

$$\omega_t = \omega + \Delta \omega \quad (222)$$

$$C_r = C + \Delta C_r + \Delta P_r = C + H \Delta \omega + \Delta P_r \quad (223)$$

El regulador, que actúa sobre la admisión de la turbina al cabo del tiempo  $t$  habrá corrido el distribuidor para dar un incremento de potencia  $\Delta P$ ; lo que habrá incrementado el par motor en el mismo valor  $\Delta P$  (por emplear la medición en tanto por uno), resultando:

$$C_m = C + \Delta P \quad (224)$$

Substituyendo los valores (222, 223 y 224) en la (218) y representando por  $D$  la operación derivada ( $d/dt$ ), la ecuación de la máquina en un incremento de carga  $\Delta P_r$  es:

$$M D \Delta \omega = \Delta P - H \Delta \omega - \Delta P_r \quad (225)$$

#### d) Ecuación diferencial del regulador.

Durante la perturbación, el regulador sufre una desviación  $\epsilon$  de su posición de equilibrio y da un incremento  $\Delta P$  a la admisión de la turbina. Admitiendo que la velocidad de este incremento es proporcional al desvío del regulador, se tiene (recordando que  $D = d/dt$ ):

$$D \Delta P = - \frac{\epsilon}{T} \quad (226)$$

$T$  es la constante de proporcionalidad, que vale

$$T = - \frac{\epsilon}{D \Delta P} \quad (227)$$

Para interpretar su valor, basta considerar una descarga brusca de la máquina, suponiendo que  $\epsilon$  se conservara constante, entonces la velocidad de cierre de la turbina  $D \Delta P$  también sería constante, y  $T$  sería el tiempo en segundos que tardaría en cerrarse completamente.

Considerando ahora el caso general de un regulador estático con acelerómetro, el valor del desvío  $\epsilon$  viene fijado por la (23), que substituido en la (226), recordando que  $D = d/dt$ , resulta:

$$D \Delta P = - \frac{1}{T} (\Delta \omega + \delta \Delta P + m D \Delta \omega) \quad (228)$$



e) Obtención de  $\Delta \omega$  y  $\Delta P$

Las ecuaciones (225) y (228) forman un sistema de ecuaciones diferenciales, de cuya resolución obtendremos  $\Delta \omega$  y  $\Delta P$ .

Observemos que el operador  $D = d/dt$  es lineal y le podemos aplicar las leyes asociativa y distributiva. Los coeficientes de las ecuaciones (225) y (228) son constantes y el operador  $D$  es permutable con todo factor constante. Dos aplicaciones sucesivas del operador  $D$  da lugar a  $d^2/dt^2$ , luego  $D^2 = d^2/dt^2$ . Por lo tanto, podremos operar con las (225) y (228) como si  $D$  fuese un factor; pero teniendo en cuenta el no utilizarlo como divisor, ya que  $1/D$  sería precisamente la operación inversa a  $D$ , o sea la integral.

Así, las ecuaciones (225) y (228) pueden escribirse, respectivamente:

$$(MD + H) \Delta \omega - \Delta P = -\Delta P_r \quad (229)$$

$$(mD + 1) \Delta \omega + (TD + \delta) \Delta P = 0 \quad (230)$$

La eliminación de las incógnitas  $\Delta \omega$  y  $\Delta P$  por determinantes da lugar a las ecuaciones:

$$\begin{vmatrix} MD + H & -1 \\ mD + 1 & TD + \delta \end{vmatrix} \Delta \omega = \begin{vmatrix} -\Delta P_r & -1 \\ 0 & TD + \delta \end{vmatrix} \quad (231)$$

$$\begin{vmatrix} MD + H & -1 \\ mD + 1 & TD + \delta \end{vmatrix} \Delta P = \begin{vmatrix} MD + H & -\Delta P_r \\ mD + 1 & 0 \end{vmatrix} \quad (232)$$

Teniendo en cuenta que  $D$  aplicado a una constante es nulo y que  $\Delta P_r$  es precisamente constante, estas ecuaciones (231) y (232) se reducen a:

$$\begin{vmatrix} MD + H & -1 \\ mD + 1 & TD + \delta \end{vmatrix} \Delta \omega = -\delta \Delta P_r \quad (233)$$

$$\begin{vmatrix} MD + H & -1 \\ mD + 1 & TD + \delta \end{vmatrix} \Delta P = \Delta P_r \quad (234)$$

que son dos ecuaciones diferenciales lineales con segundo miembro constante y de igual ecuación característica, la cual se obtiene substituyendo  $D$  por  $z$ , e igualando la determinante a cero:

$$\begin{vmatrix} Mz + H & -1 \\ mz + 1 & TD + \delta \end{vmatrix} = 0 \quad (235)$$

Resolviendo esta ecuación de 2.º grado, se encuentra por raíces dos complejos conjugados:

$$\begin{aligned} z_1 &= -\alpha + j\beta \\ z_2 &= -\alpha - j\beta \end{aligned} \quad (236)$$

en las que:

$$\alpha = \frac{H}{2M} + \frac{\delta}{2T} + \frac{m}{2MT} \quad (237)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1 + H\delta}{TM} - \alpha^2} \quad (238)$$

Esto da por integral de las (233) y (234) oscilaciones amortiguadas que pueden escribirse de la forma:

$$\Delta \omega = e^{-\alpha t} A \omega \sin(\beta t + \varphi \omega) + \beta \omega \quad (239)$$

$$\Delta P = e^{-\alpha t} A_p \sin(\beta t + \varphi_p) + \beta_p \quad (240)$$

Las constantes  $B_\omega$  y  $B_p$  dependen de los segundos miembros de las (233) y (234) y valen:

$$B_\omega = -\frac{\delta}{1 + H\delta} \Delta P_r \quad (241)$$

$$B_p = \frac{\Delta P_r}{1 + H\delta} \quad (242)$$

Las otras cuatro constantes  $A_\omega$ ,  $\varphi_\omega$ ,  $A_p$ ,  $\varphi_p$  vienen determinadas por las condiciones iniciales.

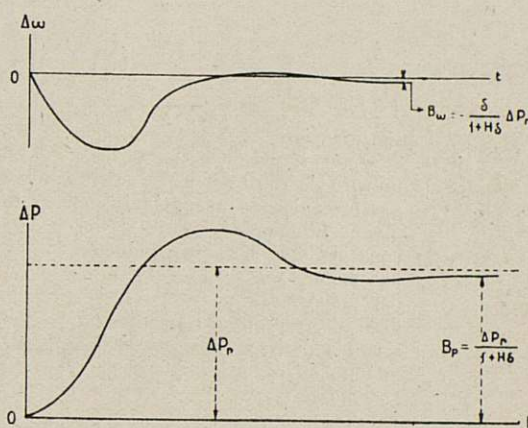


Fig. 42

La figura 43 representa un ejemplo gráfico de las (239) y (240); esto es, de  $\Delta \omega$  y  $\Delta P$  en función del tiempo para un incremento repentino  $\Delta P_r$  de la carga.

Para que haya estabilidad es preciso que las oscilaciones (239) y (240) sean amortiguadas, lo que exige  $\alpha > 0$ . Cuanto mayor sea  $\alpha$ , más estable será la regulación.

Obsérvese que según (237),  $\alpha$  está formado de tres sumandos: el primero ( $H/2M$ ) depende del efecto de la carga; el segundo ( $\delta/2T$ ) aumenta con el estatismo  $\delta$ , y el tercero ( $m/2MT$ ) aumenta con el efecto



del acelerómetro. Con esto se ve la importancia del estatismo y acelerómetro en la estabilidad de la regulación.

Para carga solamente de alumbrado y calefacción ( $H = -1$ ), si el estatismo o el acelerómetro no son suficientes,  $\alpha$  puede ser negativo, y resultan oscilaciones permanentes y de amplitud creciente.

## BIBLIOGRAFIA

- CONFÉRENCE INTERNATIONALE DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES À HAUTE TENSION.—1935, tomo I, y 1939, tomo III.
- CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN AUTOMÁTICA DE LA FRECUENCIA Y DE LA POTENCIA, por J. FALLOU.—INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN, de mayo 1936.
- THE FUTURE OF ALTERNATING CURRENT POWER TRANSMISSION, por H. RISSIK.—ENGINEERING, de enero 1939.
- LE PROBLÈME DE LA STABILITÉ DES TRANSMISSIONS A GRANDE DISTANCE PAR COURANT TRIPHASÉ.—REVUE BROWN BOVERI, de octubre 1941.

FÓRMULAS PRÁCTICAS PARA EL CÁLCULO DE LA CAÍDA DE TENSIÓN DE LOS CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA, por J. INGLÉS.—METALURGIA Y ELECTRICIDAD, de noviembre 1943.

AN APPARATUS FOR INVESTIGATING THE BEHAVIOUR OF REGULATING DEVICES.—THE BROWN BOVERI REVIEW, de julio 1944.

OPERATING RESULTS WITH NEW METHODS OF FREQUENCY-BIASED TIE LINE CONTROL.—THE BROWN BOVERI REVIEW, de julio 1945.

THE STABILIZATION OF SYNCHRONOUS GENERATORS BY HIGH SPEED REGULATION OF THE EXCITATION IN CONNECTION WITH POWER TRANSMISSION OVER LONG DISTANCES.—THE BROWN BOVERI REVIEW, de noviembre 1946.

EXPERIMENTS IN STABILIZING SYNCHRONOUS GENERATORS BY HIGH SPEED CONTROL OF THE EXCITATION IN CONNECTION WITH POWER TRANSMISSION OVER LONG DISTANCES.—THE BROWN BOVERI REVIEW, de noviembre 1946.

ESTABILIDAD DE LA MARCHA EN PARALELO DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS SINCRÓNICAS, por J. INGLÉS.—METALURGIA Y ELECTRICIDAD, agosto 1947-abril 1948.

LA MATEMÁTICA EN LA TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, por P. PUIG ADAM.—Curso de conferencias publicado por la Escuela Especial de Ingenieros Industriales de Madrid (1948).

## SÍMBOLOS PRINCIPALES:

$B_0; B_i$ ...	susceptancias.	$I_{ap}$ ...	corriente en la entrada de un segmento $p$ .
$b$ ...	susceptancia por Km.	$I_{bi}$ ...	corriente en la salida de un cuadripolo $i$ .
$C$ ...	número de centrales.	$I_{bp}$ ...	corriente en la salida de un segmento $p$ .
$C$ ...	par mecánico de una máquina en su funcionamiento normal.	$I_{ci}$ ...	corriente de una central o estación receptora $i$ .
$C$ ...	capacidad por Km. de conductor.	$I_i$ ...	corriente en un segmento $i$ .
$C_m$ ...	par motor.	$I_m$ ...	corriente en el punto de abertura de un bucle.
$C_r$ ...	par resistente.	$I_n$ ...	corriente que entra por un nudo $n$ .
$D$ ...	derivada respecto al tiempo ( $d/dt$ ).	$I_r$ ...	componente reactiva de la corriente.
$D^2$ ...	segunda derivada respecto al tiempo ( $d^2/dt^2$ ).	$I_x$ ...	corriente en un punto situado a la distancia $x$ .
$d$ ...	número de centrales más el de estaciones receptoras.	$i$ ...	insensibilidad de un regulador.
$E; E_a; E_r$ ...	f. e. m. a inyectar en un bucle.	$j$ ...	$\sqrt{-1}$ .
$E$ ...	caída de tensión de una línea.	$K_i$ ...	coeficiente de regulación secundaria.
$E_a$ ...	caída de tensión de una línea debida a la corriente activa.	$K_{pi}$ ...	coeficiente de regulación primaria.
$E_i$ ...	f. e. m. inyectada en una malla $i$ .	$L$ ...	inductancia por Km. de conductor.
$E_r$ ...	caída de tensión de una línea debida a la corriente reactiva.	$l$ ...	longitud de una línea.
$ei$ ...	número de entradas de cuadripolos en un nudo $i$ .	$M$ ...	constante de inercia de una máquina, en segundos.
$f$ ...	frecuencia.	$m$ ...	razón entre el efecto aceleramétrico y taquimétrico.
$f_0$ ...	frecuencia de ajuste de un regulador.	$m$ ...	número de mallas independientes de una red.
$f_i$ ...	frecuencia de una máquina o central $i$ .	$N$ ...	número de ecuaciones de una red.
$g$ ...	conductancia o perditancia por Km.	$N_i$ ...	número de vectores libres de una red.
$H$ ...	constante de proporcionalidad entre $\Delta C_r$ y $\Delta \omega$ .	$N_v$ ...	número de vectores que intervienen en una red.
$I$ ...	corriente.	$n$ ...	número de revoluciones por minuto.
$I_0$ ...	corriente en el extremo receptor de una línea o cuadripolo.	$n$ ...	número de máquinas en paralelo.
$I_i$ ...	corriente en el extremo generador de una línea o cuadripolo.	$n$ ...	número de nudos de una red.
$I_a$ ...	componente activa de la corriente.	$n_0$ ...	número de nudos desprovistos de central generadora.
$I_{ai}$ ...	corriente en la entrada de un cuadripolo $i$ .	$P$ ...	potencia activa.
		$P$ ...	potencia transmitida por una línea.
		$P$ ...	potencia de $n$ máquinas en paralelo.
		$P$ ...	potencia motriz de una máquina.
		$P_0$ ...	potencia activa en el extremo receptor.



$P_l$ ... ..	potencia activa en el extremo generador.	$U_{bp}$ ... ..	tensión de salida de un segmento $p$ .
$P_a$ ... ..	potencia aparente.	$U_m$ ... ..	tensión que aparece al abrir un bucle.
$P_{ao}$ ... ..	potencia compleja en el extremo receptor.	$U_i$ ... ..	tensión de un nudo $i$ .
$P_{al}$ ... ..	potencia compleja en el extremo generador.	$U_x$ ... ..	tensión de un punto situado a la distancia $x$ .
$P_e$ ... ..	potencia eléctrica del alternador.	$X$ ... ..	reactancia de una línea.
$P_i$ ... ..	potencia activa de una central $i$ .	$x$ ... ..	reactancia por Km. de conductor.
$P_l$ ... ..	potencia de una máquina o central $i$ .	$Y$ ... ..	admitancia de una línea.
$P_l$ ... ..	potencia de una máquina o central en la repartición correcta de carga.	$Y_o; Y_l$ ... ..	admitancias del equivalente en $\pi$ .
$P_r$ ... ..	potencia resistente de una máquina.	$Y_e$ ... ..	admitancia del equivalente en T.
$P_{ri}$ ... ..	demanda de carga de una red $i$ .	$Z$ ... ..	impedancia de una línea.
$P_{si}$ ... ..	potencia de una interconexión.	$Z_o$ ... ..	impedancia en el extremo receptor de una línea.
$P_{si}$ ... ..	potencia de una interconexión en la repartición correcta de carga.	$Z_o; Z_l$ ... ..	impedancias del equivalente en T.
$Q$ ... ..	potencia reactiva.	$Z_c$ ... ..	impedancia característica de una línea.
$Q_o$ ... ..	potencia reactiva en el extremo receptor.	$Z_e$ ... ..	impedancia del equivalente en $\pi$ .
$Q_i$ ... ..	potencia reactiva en el extremo generador.	$Z_i$ ... ..	impedancia de un segmento $i$ .
$Q_c$ ... ..	potencia reactiva que da la capacidad de media línea.	$z$ ... ..	raíces de la ecuación característica.
$Q_l$ ... ..	potencia reactiva que da la capacidad de media línea.	$\Delta$ ... ..	incremento de la variable a que precede.
$R$ ... ..	resistencia de una línea.	$\Delta P_i$ ... ..	desviación de la potencia $P_i$ .
$R_i$ ... ..	resistencia de ajuste.	$\Delta P_{si}$ ... ..	desviación de la potencia $P_{si}$ .
$r$ ... ..	resistencia por Km. de conductor.	$\delta$ ... ..	desplazamiento angular entre dos tensiones.
$S$ ... ..	número de estaciones receptoras.	$\delta_i$ ... ..	estatismo.
$s$ ... ..	número de segmentos o líneas de una red.	$\delta_l$ ... ..	estatismo de una máquina $i$ .
$sf$ ... ..	número de segmentos sin regulación en una red.	$\epsilon$ ... ..	desviación de un regulador.
$si$ ... ..	número de salidas de cuadripolos en nudo $i$ .	$\epsilon_i$ ... ..	desviación de un regulador $i$ .
$T$ ... ..	constante de tiempo del regulador en segundos.	$\epsilon_{pi}$ ... ..	desviación de un regulador primario $i$ .
$t$ ... ..	tiempo.	$\epsilon_{si}$ ... ..	desviación de un regulador secundario $i$ .
$t$ ... ..	número de nudos en una malla $i$ .	$\varphi_u$ ... ..	fase de $E_a$ .
$U$ ... ..	tensión.	$\varphi_r$ ... ..	fase de $E_r$ .
$U_o$ ... ..	tensión en el extremo receptor de una línea o cuadripolo.	$\omega$ ... ..	pulsación de la corriente alterna.
$U_i$ ... ..	tensión en el extremo generador de una línea o cuadripolo.	$\omega$ ... ..	velocidad angular de una máquina.
$U_{ap}$ ... ..	tensión de entrada de un segmento $p$ .	$\omega_t$ ... ..	velocidad angular de una máquina en el tiempo $t$ .

OBSERVACIÓN.—Un punto encima del símbolo indica que es un vector, y la señal  $\vee$  indica que es el vector conjugado.







## N.º 120. - Estabilidad de la marcha en paralelo de las máquinas eléctricas sincrónicas

Autor: D. JUAN INGLÉS COMAS  
Ingeniero Industrial

### A.—CONSIDERACIONES GENERALES

#### a) BREVE RESEÑA HISTÓRICA.

El fenómeno de la pérdida de sincronismo, que se observaba algunas veces, quedó particularmente puesto en evidencia en los primeros años del empleo de los condensadores síncronos, cuando tiene por causa la formación de oscilaciones pendulares de amplitud creciente. En 1911, L. Dreyfus (1), en Alemania, demostró que la tendencia a la formación de estas oscilaciones crecientes disminuía al aumentar la carga y al disminuir la excitación, y que puede reducirse con el empleo de devanados o circuitos amortiguadores. Como se verá, estas oscilaciones tienen lugar con pequeñas cargas y, especialmente, en vacío; por esto se comprende que su presencia se puso particularmente de manifiesto en los condensadores síncronos.

En 1923 se efectuaron unos ensayos mediante un sistema en miniatura (2) formado por bobinas y resistencias operando a 2.380 voltios, que representaba dos líneas de transmisión, y algunas máquinas sincrónicas accionadas por motores de corriente continua. Se llegó a la conclusión de que las oscilaciones pendulares de amplitud creciente tienen lugar cuando la re-

sistencia óhmica es relativamente grande comparada con la reactancia, y que estas oscilaciones se favorecen al aumentar la excitación.

En 1922-23, debido a los proyectos de los grandes transportes de energía eléctrica en los Estados Unidos, tomó considerable importancia el problema de la potencia límite de un sistema de transmisión, para lo cual se empezaron a efectuar en 1924 estudios de la estabilidad de los sistemas eléctricos a fin de determinar las características económicas de un número de proyectos de grandes sistemas de transmisión; incluso se llegó a instalar en unos talleres una red en miniatura de 2.300 voltios, formada principalmente por varios alternadores de 225 KVA (3), con el objeto de investigar el límite de potencia, el cual está íntimamente ligado con los fenómenos de la estabilidad de la marcha en paralelo, ya que este límite queda fijado por las características de equilibrio del sistema en régimen permanente y por la facultad de mantener este equilibrio en los casos de régimen perturbado.

En los trabajos y discusiones que se presentaron en 1924 en el Instituto Americano de Ingenieros Electricistas se inició la necesidad de enfocar el problema del límite de potencia, no como dependiente solamente de



las líneas de transmisión, sino también de las máquinas, transformadores y carga del sistema.

En 1925 se aprovechó la ocasión para efectuar pruebas de estabilidad en el sistema de la «Pacific Gas and Electric Company», de los Estados Unidos, que está formado por largas líneas de 220 KV. (4 y 5).

Debido a la gran sequía que ocurrió en 1925 en Georgia y Carolina (Estados Unidos) se vieron obligados a forzar considerablemente la carga de unas líneas 110 KV. de interconexión entre los sistemas de «Alabama Power Company» y de «Georgia Power Company»; se presentaron algunas interrupciones, que una vez analizadas detenidamente, se atribuyeron a pérdidas de sincronismo. Después de celebrar muchas conferencias entre los ingenieros respecto a los métodos de cálculo empleados y el límite de potencia de estas líneas, pareció que para casos de disturbios aquél aún era inferior a la potencia para la cual se habían proyectado las líneas, lo que fué causa de discusión sobre las diferentes maneras de aumentar dicho límite. Sin embargo, como los cálculos involucraban muchas suposiciones y factores indeterminados, después de largo período de discusión se llevaron a cabo unas pruebas referentes a la estabilidad de estas líneas (6) durante 1927.

Muchos y continuados han sido los estudios que se han ido efectuando respecto a la estabilidad de la marcha en paralelo. En octubre de 1936 se inauguraron las líneas de 287.500 voltios, de 436 km. de longitud, de Boulder Dam a Los Ángeles; proyecto para el cual se efectuaron muchos estudios para determinar el límite de potencia de este sistema (7).

#### b) CRITERIO DE LA ESTABILIDAD Y LÍMITES DE POTENCIA.

Se entiende que la marcha en régimen permanente de una máquina sincrónica es estable cuando, al producirse un desequilibrio entre el par motor y el resistente, se produce un efecto en la máquina, que tiende a equilibrar de nuevo los dos pares; es decir: si por cualquier motivo el par motor supera al resistente, la máquina tendrá tendencia a embalsarse y el campo producido por el rotor se avanzará; si este avance produce un aumento en la potencia eléctrica que suministra la máquina, el par resistente aumentará y se restablecerá el equilibrio; entonces, la marcha será estable.

En cambio, si el avance del rotor produce disminución de la potencia eléctrica, la marcha será inestable.

La marcha de máquinas sincrónicas conectadas en serie es generalmente inestable; en cambio, la marcha en paralelo es, por lo general, estable.

Cuando varias máquinas sincrónicas trabajan en paralelo y, debido a cualquier causa, se produce un desplazamiento angular en el rotor de una o algunas de ellas, se origina una corriente de circulación entre estas máquinas y las restantes. Para que se mantenga el sincronismo es preciso que esta corriente nos haga aumentar la potencia de las máquinas que se han avanzado y disminuir la de las otras; por esto se le da el nombre de corriente sincronizante o de sincronización. Cuanto mayor sea la impedancia que debe atravesar esta corriente, menos intensa será ésta y menos estable será la marcha en paralelo. Por lo tanto, sin entrar en fórmulas y cálculos, puede decirse que, por lo general, la marcha en paralelo entre dos máquinas sincrónicas, o dos grupos de ellas, es tanto más estable cuanto menor sea la impedancia que las conecta en paralelo.

Al presentarse una perturbación en la marcha en paralelo, la corriente de sincronización entre las máquinas de una misma central siempre será más importante que la que puede circular entre dos centrales; por esto, las pérdidas de sincronismo suelen presentarse en todas las máquinas de una misma central como si se tratase de una sola máquina.

Cuando el rotor de una máquina entra en oscilación puede ocurrir que aquélla sea de amplitud amortiguada o de amplitud creciente (apartado B-g); en el primer caso, si la máquina no pierde el sincronismo en la primera oscilación, su funcionamiento será estable; en cuanto al segundo, una máquina que trabaje en unas condiciones tales que puedan tener lugar estas oscilaciones de amplitud creciente, su funcionamiento es inestable, pues su estado es comparable al del equilibrio mecánico de un cono apoyado por su vértice.

La existencia de circuitos amortiguadores es, en general, suficiente para evitar estas oscilaciones crecientes. Para el caso de no existir estos circuitos, hemos de tener presente que en la práctica siempre existen pérdidas, y si la resistencia óhmica no es relativamente elevada, puede que estas oscilaciones tampoco tengan lugar.



Así, considerando una máquina sincrónica en régimen permanente, por lo general deben estimarse dos zonas de funcionamiento: una estable y otra inestable. A medida que la carga de la máquina aumenta, nos acercamos a la zona de inestabilidad, y en el momento que entramos en ella, la carga de la máquina constituye el *límite de potencia en régimen permanente*.

Si suponemos que mientras la carga aumenta, las excitaciones de las máquinas permanecen constantes, el límite de potencia a que nos conduce recibe el nombre de *estático* (5). En cambio, si se tiene en cuenta el efecto de los reguladores de modo que aumente la excitación a medida que aumenta la carga, tendremos un límite de potencia de valor más elevado, al que se le da el calificativo de *artificial* (5).

Cuando la necesidad de transmitir potencias eléctricas cada vez más elevadas nos llevó al estudio del límite de potencia de un sistema, se empezó estudiando analíticamente la estabilidad en régimen permanente, lo que nos condujo a la determinación del límite de potencia estático; pero observaciones y estudios analíticos, que se efectuaron más tarde, nos indicaron que el comportamiento de la estabilidad durante los fenómenos transitorios, y, principalmente, en los casos de cortocircuitos, es de la mayor importancia.

Al presentarse una perturbación, como, por ejemplo, un cortocircuito, puede ocurrir pérdida de sincronismo aunque la máquina trabaje dentro de la zona de funcionamiento estable, pues el desequilibrio entre los pares motor y resistente puede ser de la suficiente magnitud para que al oscilar el rotor y pasar a la zona inestable no pueda volver a la zona estable (véase apartado B-c).

Cuanto mayor sea la carga de una máquina más se acercará a la zona de funcionamiento inestable y, por lo tanto, con más facilidad perderá el sincronismo al presentarse una perturbación. La máxima carga que puede suministrar una máquina o un sistema para que no haya pérdida de sincronismo al presentarse una perturbación es el *límite de potencia en régimen perturbado*. El valor de este límite depende de la perturbación que se considere y, por lo general, se toman las debidas a cortocircuito, que nombradas en orden ascendente a la perturbación que producen, son: una fase a tierra, cortocircuito entre fases, dos fases a tierra y trifásico.

#### c) FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA ESTABILIDAD Y DISTINTAS MANERAS DE MEJORARLA.

Muchos son los factores que intervienen en la estabilidad de la marcha en paralelo, y puede decirse de un modo general que, cuanto más eficaz sea la interconexión entre centrales, más se favorecerá la estabilidad. Además, los casos prácticos exigen que se tengan en cuenta las perturbaciones, ya que en este estado es cuando la estabilidad está más comprometida. Las oscilaciones de las máquinas serán más o menos lentas, según la inercia de las masas giratorias, lo que nos indica que esta inercia y el tiempo de eliminación de los defectos juegan importante papel.

*Tensión de las líneas de transmisión.*—La impedancia que representa una línea de transmisión es inversamente proporcional al cuadrado de la tensión empleada y, por lo tanto, en lo que a estas líneas se refiere, puede decirse que los límites de potencia son sensiblemente proporcionales al cuadrado de esta tensión.

*Corriente de capacidad de las líneas de transmisión.* En las largas líneas de transmisión, debido a la gran longitud y a la elevada tensión, la corriente de capacidad de la línea alcanza valores elevados, lo que disminuye la tensión inicial y la corriente de excitación de las máquinas y, por lo tanto, el límite de potencia.

*Reactancia de generadores.*—Durante toda perturbación, la reactancia transitoria de las máquinas constituye parte importante de la impedancia que las interconecta, y, por lo tanto, su valor tiene marcada influencia en la estabilidad. Escogiendo valores bajos para esta reactancia, mejoraremos dicha estabilidad aumentando el límite de potencia.

*Circuitos amortiguadores.*—Puede considerarse que estos circuitos tienen dos efectos que, más que ser distintos, son opuestos, a saber: el aumento de la corriente de cortocircuito desequilibrado que da la máquina, y el efecto de amortiguamiento. El primero es debido a que la reactancia inversa de las máquinas disminuye con la presencia de los circuitos amortiguadores, aumentando la corriente de cortocircuito y el choque que se produce en la máquina. Este efecto es perjudicial para la estabilidad de la máquina; pero, en general, no es de gran importancia.

El efecto de amortiguamiento mejora la estabilidad en un grado que, por lo general, supera grandemente



al efecto anterior. Este efecto disminuye la amplitud de las oscilaciones y evita en general la formación de las de amplitud creciente (apartado B-g).

*Inercia de las máquinas.*—Se comprende que cuanto mayor sea la inercia de la masa giratoria de una máquina, más lentas serán sus oscilaciones, y que, por lo tanto, con el mismo tiempo de eliminación del defecto, la amplitud de las oscilaciones será menor. Luego, si aumentamos la inercia de las máquinas, conseguiremos aumentar el límite de potencia.

*Tiempo de eliminación de los defectos.*—Al disminuir este tiempo se aumenta el límite de potencia siguiendo una curva asintótica (fig. 1). Puede observarse que este aumento es relativamente pequeño mientras

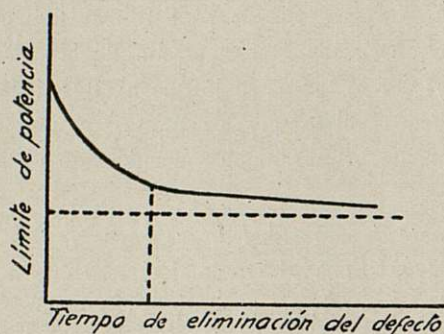


Fig. 1

los tiempos permanezcan superiores a un cierto valor (fig. 1); pero cuando estos tiempos se reduzcan por debajo de este valor, el aumento del límite de potencia puede ser de consideración.

*Impedancia en el neutro.*—El efecto de las impedancias que conectan el neutro a tierra consiste en disminuir el choque que tiene lugar al presentarse un defecto a tierra.

Si la conexión a tierra del neutro se efectúa a través de un reactor (8), la mejora en la estabilidad es notable para los casos de una o dos fases a tierra. Además reduce considerablemente las corrientes de cortocircuitos a tierra y las interferencias telefónicas durante estos disturbios.

La bobina Petersen no es más que un reactor cuya inductividad es lo suficientemente elevada para que la corriente inductiva del defecto sea igual a la debida a la capacidad electrostática del sistema, reduciendo así a un valor muy bajo la corriente del defecto, cuyo factor de potencia pasa a ser prácticamente la unidad.

Además, esta bobina hace que los arcos a tierra sean inestables, por lo que se apagan, y que la tensión del defecto se restablezca lentamente, evitándose el reencendido del arco. Con la instalación de bobinas Petersen bien ajustadas puede considerarse que los cortocircuitos a tierra quedan prácticamente suprimidos.

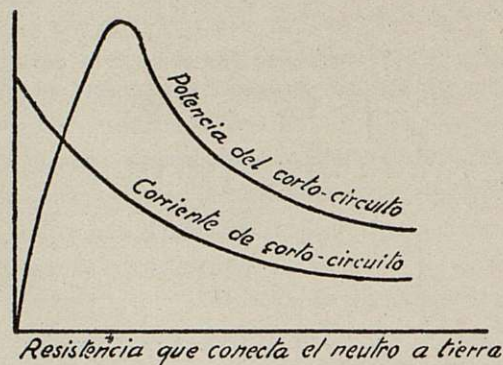


Fig. 2

En todo proyecto podemos alejar la posibilidad de cortocircuitos entre fases por una colocación y separación adecuada entre los conductores de las líneas, barras de distribución y demás conexiones, así como también empleando disyuntores y transformadores formados por tres tanques monofásicos; pero ninguna de estas medidas contribuye a alejar los defectos a tierra. No obstante, si además de esto se instalan bobinas Petersen, parece que podríamos reducir mucho las posibilidades de cortocircuito, y, por lo tanto, quedarían alejadas notablemente las posibilidades de pérdida de sincronismo, ya que generalmente este fenómeno tiene origen en los cortocircuitos.

Sin embargo, en la práctica esto tiene siempre un límite económico y mucho más si consideramos el caso de instalaciones ya en explotación. En cuanto a la bobina Petersen, mucho se ha discutido de sus ventajas y eficacia y no creemos sea ahora oportuno hablar de ello, contentándonos con indicar que representa notable ventaja sobre el neutro aislado; pero en comparación con el neutro a tierra directamente o a través de resistencias o reactancias relativamente débiles, su superioridad se ha puesto muy en duda para los casos de redes complicadas.

En la conexión a tierra del neutro a través de resistencia, la corriente y la potencia debida al defecto, para distintas resistencias, en el neutro siguen curvas muy



distintas (fig. 2), lo que nos conduce a los dos criterios siguientes:

Dar a la resistencia un valor relativamente elevado para limitar la corriente de cortocircuito y reducir el choque que se produce.

El otro criterio consiste en dar a la resistencia un valor bajo para aprovechar los puntos altos de la curva de potencia (fig. 2) y cargar la máquina para producir un efecto de frenaje que reduciría notablemente el avance del rotor. Por este criterio puede mejorarse la estabilidad en caso de defectos a tierra; pero el valor de la resistencia debería determinarse por medio de cuidadosos estudios en cada caso particular; además, el peligro de interferencias telefónicas es mayor que en caso de emplear limitadores de corriente, ya sean por resistencia o por reactancia.

*Resistencias estabilizadoras.*—El empleo de resistencias que durante un cortocircuito se conectasen en serie con el inducido de la máquina, reduciría la corriente de cortocircuito, elevando al propio tiempo su factor de potencia. Entonces el desequilibrio que se produce en la máquina entre el par motor y el resistente no sería tan importante y el avance del rotor se reduciría notablemente. Según cálculos efectuados, por este procedimiento se obtiene mejora considerable en la estabilidad (7 y 9).

La intercalación de estas resistencias podría efectuarse mediante un interruptor que en el momento de presentarse el cortocircuito se desconectase automáticamente y dejase de «shuntar» unas resistencias instaladas en serie.

Hasta la actualidad no sabemos que este procedimiento se haya puesto en práctica, pero sería interesante efectuar pruebas para ver si en la práctica se obtiene la considerable mejora que la teoría prevé.

*Condensadores síncronos.*—Un condensador síncrono instalado en un punto intermedio de una línea de transmisión aumenta el límite de potencia. Considerando el caso teórico de un condensador síncrono de capacidad infinita instalado en el punto medio de la línea, el cual mantendría constante el voltaje en este punto, el aumento del límite de potencia estático sería del 41 por 100 (10); pero en la práctica este aumento sufriría una gran reducción que dependería de la capacidad y características del condensador síncrono, y que, por lo general, no llegaría a la mitad del aumento teórico.

En las largas líneas de transporte, la instalación de condensadores síncronos intermedios dividen la línea en secciones que, por ser éstas de longitud mucho menor, permiten aumentar el límite de potencia.

*Inyección de f. e. m. transversales en la línea.*—En las largas líneas de transporte, la reactancia de la línea es de los factores que más contribuyen a reducir el límite de potencia; inyectando f. e. m. transversales mediante transformadores adecuados puede conseguirse anular el efecto de la reactancia de la línea y mejorar grandemente su límite de potencia. Además, la corriente que toman estos transformadores puede compensar parcial o totalmente, según la carga de la línea, la corriente de capacidad electrostática de la misma.

*Reguladores de tensión.*—Los reguladores de tensión de las máquinas juegan importante papel. Una rápida excitación al presentarse un cortocircuito fa-

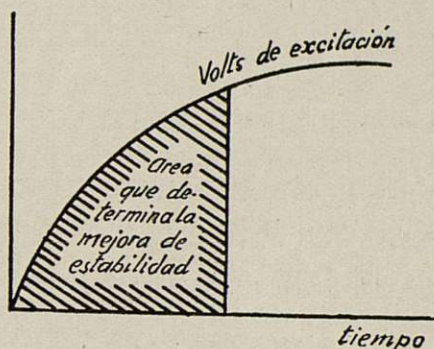


Fig. 3

vorece considerablemente la estabilidad; no obstante, los antiguos reguladores de tensión no mejoran la estabilidad tanto como a primera vista parece, pues la excitación que proporcionan a la máquina no es lo suficientemente rápida.

Mr. Longley, en un apéndice del trabajo presentado por Jones y Treat (6), demuestra cómo la mejora en la estabilidad no viene determinada, ni por el voltaje tope de excitación de la máquina, ni por la inclinación (volts./segundo) de la característica de excitación; sino por el área (volts.  $\times$  segundo) comprendida entre esta característica y el eje de tiempo (fig. 3). Así, para mejorar la estabilidad, es conveniente que la excitación sea lo más rápida que se pueda desde el primer momento.

Esto explica la ventaja del empleo de dos excitatrices y de la hiperregulación, en la que la tensión de



funcionamiento normal que da la excitatriz piloto es superior a la necesaria para dar la excitación tope a la excitatriz principal, y al presentarse un cortocircuito, la excitación de esta excitatriz puede aumentar mucho más rápidamente. Sin duda que éste es uno de los factores que más contribuye a mejorar la estabilidad en las máquinas modernas, ya que desde el primer momento la potencia eléctrica de la máquina se mantiene mucho más, reduciéndose mucho el avance del rotor.

*Disyuntores monofásicos de reconexión automática y rápida.*—El empleo de líneas de unión, con eliminación de defectos, separadamente en las tres fases permite conservar la unión de la fase o fases no defectuosas durante el cortocircuito, lo que reduce los desplazamientos angulares entre las máquinas. Si en los casos de defectos transitorios se reconecta automáticamente en una fracción de segundo la fase que haya disparado, se mejora notablemente la estabilidad.

## B) RESUMEN ANALÍTICO

### a) DESCOMPOSICIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA DE UNA MÁQUINA SINCRÓNICA.

Esta descomposición es general sea cualquiera el número de máquinas del sistema; pero para no abusar de cálculos y expresiones matemáticas, vamos a demostrarla sólo para un sistema de tres máquinas, después de lo cual será fácil comprender su generalización para cualquier número de ellas.

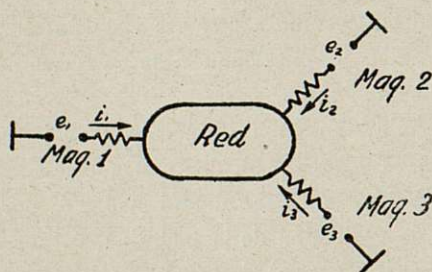


Fig. 4

Suponemos un sistema de tres máquinas, cuyas condiciones de carga, en valores instantáneos, se indica esquemáticamente en la figura 4 y consideremos los

tres estados de este sistema (figs. 5, 6 y 7), en que se anula, respectivamente, la tensión interior de las máquinas 2-3, 3-1 y 1-2. Por ser lineal la relación que liga las intensidades con las tensiones, si superpone-

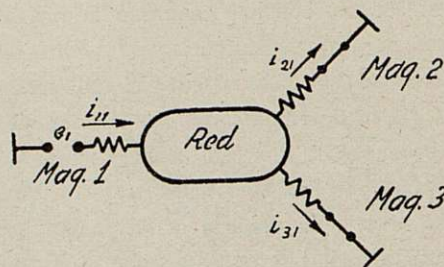


Fig. 5

mos estos tres estados, es evidente que tendremos el estado real de la figura 4. Si se hace la superposición correspondiente a la máquina 1 se tiene:

$$i_1 = i_{11} - i_{12} - i_{13} \quad (1)$$

$$p_1 = e_1 i_1 = e_1 i_{11} - e_1 i_{12} - e_1 i_{13} \quad (2)$$

y pasando de valores instantáneos a eficaces, tendremos:

$$P_1 = E_1 I_{11} \cos \varphi_{11} - E_1 I_{12} \cos (\delta_{12} + \varphi_{12}) - E_1 I_{13} \cos (\delta_{13} + \varphi_{13}) \quad (3)$$

en donde

$$I_{11} = \frac{E_1}{Z_{11}} \quad (4) \quad I_{12} = \frac{E_2}{Z_{12}} \quad (5) \quad I_{13} = \frac{E_3}{Z_{13}} \quad (6)$$

y haciendo

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{11} &= \frac{\pi}{2} - \varphi_{11} \\ \alpha_{12} &= \frac{\pi}{2} - \varphi_{12} \\ \alpha_{13} &= \frac{\pi}{2} - \varphi_{13} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

se obtiene

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}) + \frac{E_1 E_3}{Z_{13}} \sin (\delta_{13} - \alpha_{13}) \quad (8)$$

Esta fórmula demuestra la descomposición de la potencia de la máquina 1 en tres componentes, los cuales corresponden a cada uno de los tres términos del segundo miembro; el primer término es una potencia



independiente de la posición angular de los rotores de las máquinas, mientras que los otros dos representan potencias que dependen de esta posición, ya que figuran en ellos los ángulos  $\delta_{12}$  y  $\delta_{13}$ . Estas potencias son las que circulan entre las máquinas 1-2 y 1-3, respectivamente, dependientes del desplazamiento angular, y

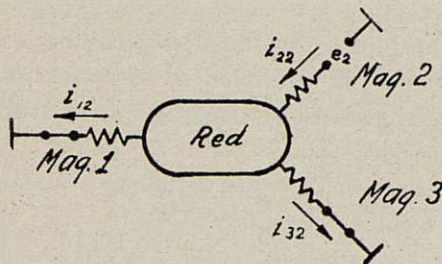


Fig. 6

por esto se les llama potencias sincronizantes o de sincronización.

Se comprende que operando en la misma forma, descompondríamos en  $n$  componentes las potencias correspondientes a un sistema de  $n$  máquinas.

Si para  $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$  se toman las tensiones entre fase y neutro, la potencia  $P_1$  será la correspondiente por fase; en cambio, si para  $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$  se toman las tensiones entre fases, como cada término de la fórmula (8) vendrá multiplicado por  $|\sqrt{3} \times \sqrt{3}|$ , la potencia  $P_1$  será la trifásica.

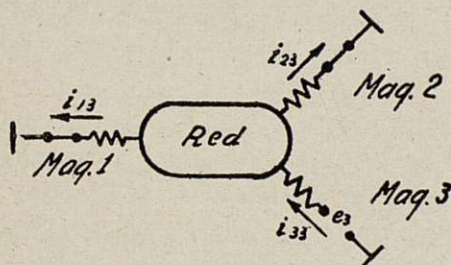


Fig. 7

A la impedancia  $Z_{11}$  se le puede dar el nombre de impedancia indiferente (en inglés, *Driving point impedance*<sup>11 y 12</sup>) y a las impedancias  $Z_{12}$  y  $Z_{13}$ , el de impedancias de sincronización entre las máquinas 1-2 y 1-3, respectivamente (en inglés, *Transfer impedance*<sup>11 y 12</sup>).

Las fórmulas 4, 5 y 6 y las figuras 5, 6 y 7 indican la manera de determinar los valores de estas impedancias correspondientes a una red dada. Si la red es algo complicada, esta determinación puede resultar la-

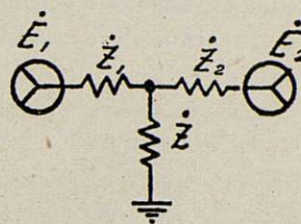


Fig. 8

boriosa; tanto es así, que en muchos casos se acostumbra a recurrir a simplificaciones, como, por ejemplo, la de despreciar las resistencias óhmicas.

Al calcular la impedancia de sincronización  $Z_{11}$  entre dos máquinas 1 y 2, después de operar con los acoplamientos en serie y en paralelo de las distintas impedancias para reducir la red a su mínima expresión, nos encontraremos con el esquema de la figura 8 y entonces tendremos que la corriente de la máquina 2, siendo nula la tensión  $E_1$ , vadrá:

$$i_{22} = \frac{E_2}{Z_2 + \frac{Z Z_1}{Z + Z_1}} = \frac{E_2(Z + Z_1)}{Z Z_1 + Z_1 Z_2 + Z_2 Z} \quad (9)$$

y la parte de esta corriente que recibirá la máquina 1 será:

$$i_{12} = \frac{Z Z_1}{Z + Z_1} i_{22} = \frac{Z}{Z + Z_1} \cdot \frac{E_2(Z + Z_1)}{Z Z_1 + Z_1 Z_2 + Z_2 Z} = \frac{E_2}{Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z}} \quad (10)$$

Según las fórmulas (5) y 10 se tiene:

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 + Z_2}{Z} \quad (11)$$

Obsérvese que esta fórmula no cambia al permutar  $Z_1$  y  $Z_2$ , lo que demuestra que:

$$Z_{12} = Z_{21} \quad (12)$$

Así la impedancia de sincronización debe considerarse como recíproca entre dos máquinas y no de una máquina con respecto a otra.



En cuanto a la impedancia indiferente de la máquina 1 (fig. 8) es fácil ver según la fórmula (4) que:

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_1 + \frac{ZZ_2}{Z + Z_2} \quad (13)$$

En caso de considerar solamente dos máquinas, aplicando la fórmula (8), teniendo en cuenta que  $\delta_{21} = -\delta_{12}$ , se tiene:

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}) \quad (14)$$

$$P_2 = \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin (\delta_{12} + \alpha_{12}) \quad (15)$$

y si para simplificar se desprecian las resistencias óhmicas se obtiene:

$$P_1 = \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin \delta_{12} \quad (16)$$

$$P_2 = - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin \delta_{12} \quad (17)$$

Entonces la máquina 1 trabajará como generador y la 2 como motor.

#### b) LÍMITE ESTÁTICO DE POTENCIA DE UN SISTEMA.

Según la definición de este límite de potencia (apartado A-b), su determinación no tiene interés práctico, pues sólo indica la potencia máxima del sistema en régimen permanente y aun suponiendo que la excitación de las máquinas permanezca constante.

Colocados en este terreno, a pesar de la complicación del fenómeno, como dejan de intervenir en él algunos factores que lo complican extraordinariamente, como son la energía cinética de las máquinas y las oscilaciones que tienen lugar en todo cambio de régimen, los análisis matemáticos pueden profundizar más. Se han establecido métodos analíticos para más de dos máquinas <sup>10 12 y 13</sup>. En estos métodos, toda carga del sistema, aunque no sea estática (condensadores síncronos y motores de inducción), queda substituída por una admitancia equivalente; entonces, el sistema queda representado por una red de impedancias y admitancias alimentadas por las máquinas generadoras.

#### c) CASO IDEAL DE DOS MÁQUINAS; MÉTODO DE LAS ÁREAS.

El método que ahora vamos a exponer, llamado de las áreas, sólo es aplicable para el caso ideal de dos

máquinas con excitaciones constantes. Este método lo creemos de gran interés, porque en su estudio se ve bien el mecanismo de la estabilidad y pérdida de sincronismo en régimen perturbado. En cuanto a su aplicación práctica para la determinación aproximada de límites de potencia, puede decirse que es aplicable a la mayoría de los casos prácticos simplificándolos hasta reducirlos a dos máquinas; pero, si se trata de máquinas provistas de hiperregulación u otro sistema rápido de regulación de tensión, el error que se comete al suponer constantes las excitaciones puede ser de consideración.

En la exposición de este método se admiten las siguientes hipótesis simplificativas:

1.<sup>a</sup> No se tendrá en cuenta ningún efecto de los reguladores de tensión de las máquinas, suponiendo constantes sus excitaciones.

2.<sup>a</sup> Se despreciarán todas las resistencias óhmicas y capacidades electroestáticas.

3.<sup>a</sup> Las reactancias en fase y en cuadratura de las máquinas se supondrán del mismo valor (véase en el Apéndice III la complicación que se presenta al tener en cuenta la diferencia entre estas reactancias).

4.<sup>a</sup> Como se trata de estudiar la estabilidad en las perturbaciones, las tensiones interiores transitorias de las máquinas se consideran constantes (designándose por  $E_1$  y  $E_2$ ). Se tomarán las reactancias transitorias y no se tendrán en cuenta las subtransitorias <sup>15</sup>.

5.<sup>a</sup> Se despreciará todo efecto de saturación de las máquinas.

6.<sup>a</sup> No se tendrá en cuenta ningún efecto de amortiguamiento, y sólo se estudiará la primera oscilación.

7.<sup>a</sup> Se supondrá constante el par motor, despreciando, por lo tanto, todo efecto de los reguladores de frecuencia.

8.<sup>a</sup> Para los efectos de proporcionalidad entre potencias y pares y entre tensiones y flujos, se admitirá como constante la velocidad instantánea de las máquinas durante oscilaciones, pues, mientras se mantiene el sincronismo, la variación que puede experimentar esta velocidad es realmente pequeña.

9.<sup>a</sup> Se supondrá que la eliminación de un cortocircuito tiene lugar disparando simultáneamente todos los disyuntores afectados.

Supongamos ahora el caso ideal de dos máquinas con una reactancia de sincronización  $X$  entre ellas;



las fórmulas (16 y 17) nos dicen que la máquina 1 trabajará como generador y la 2 como motor y que la potencia de sincronización valdrá

$$P = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta_s \quad (18)$$

Esta fórmula nos dice que  $P$  viene determinando por la senoide de la figura 9, y como se admite proporcionalidad entre potencias y pares, esta senoide puede re-

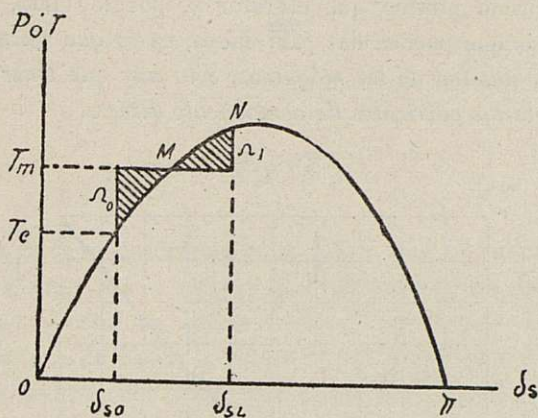


Fig. 9

presentar indistintamente los valores de estas dos variables, según la escala de las ordenadas. En este caso ideal, la curva en cuestión y la fórmula (18) tanto pueden corresponder al generador como al motor; pero para fijar ideas se atribuirá al generador, que se supone es la máquina 1.

La potencia máxima de sincronización vendrá determinada por la fórmula:

$$P_{\max} = \frac{E_1 E_2}{X} \quad (19)$$

Si se tomasen las reactancias sincrónicas de las máquinas en lugar de las transitorias y  $E_1$ ,  $E_2$  fuesen las tensiones interiores sincrónicas en lugar de las tensiones interiores transitorias,  $P_{\max}$  sería el límite de potencia estático para las excitaciones que se considerasen.

Si suponemos ahora que, debido a una perturbación cualquiera hay un desequilibrio entre el par mecánico  $T_m$  y el par eléctrico  $T_e$  (fig. 9), el rotor de la máquina 1, que trabaja como generador, se avanzará, y el de la máquina 2, que trabaja como motor, se retrasará; por lo que  $\delta_s$  aumentará. La diferencia entre la energía mecánica y la eléctrica vendrá representada

por el área  $\Omega_0$  (fig. 9), que será absorbida en forma de energía cinética por las masas giratorias de las dos máquinas, y cuando se haya llegado al punto M (fig. 9), continuará la oscilación hasta el punto N para devolver toda la energía absorbida. El área  $\Omega_1$  representa la energía devuelta, y es evidente que, despreciando todo amortiguamiento, las áreas  $\Omega_0$  y  $\Omega_1$  deben ser iguales, y que los rotores de las dos máquinas oscilarán variando  $\delta_s$  entre los valores  $\delta_{s0}$  y  $\delta_{s1}$  (fig. 9).

Si los valores  $T_m$  y  $T_e$  fuesen tales que al llegar al punto R (fig. 10), las áreas  $\Omega_0$  y  $\Omega_m$  fuesen iguales, aún habría estabilidad; pero si el  $\Omega_m$  fuese menor que  $\Omega_0$ , los rotores continuarían su oscilación y, como el par eléctrico pasaría a ser menor que el mecánico, ya no sería posible absorber más fuerza viva de las masas giratorias y se perdería el sincronismo. Así, la

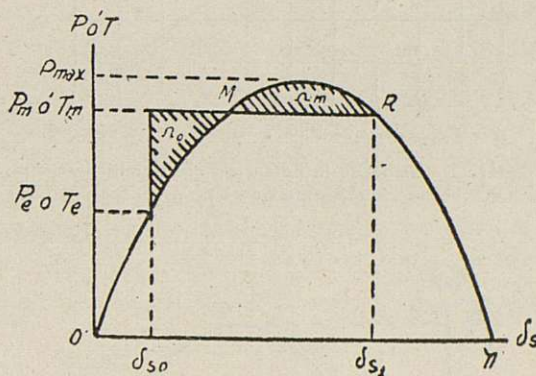


Fig. 10

figura 10, en que  $\Omega_0 = \Omega_m$ , representa el caso límite dentro de la zona estable, al que se denomina *caso crítico*.

Considerando varios casos críticos para distintos valores de  $\delta_{s0}$  y determinando los valores  $P_e/P_{\max}$  y  $P_m/P_{\max}$  correspondientes, se ha preparado el gráfico número 1, el cual tiene interés cuando el desequilibrio entre los pares mecánico y eléctrico es provocado por un aumento repentino de carga, estableciendo la relación entre este aumento y la carga inicial o límite de potencia para poder admitir el aumento conservando la estabilidad.

Cuando en un sistema ideal de dos máquinas se desconecta algún circuito de interconexión, la reactancia de sincronización sufre un aumento (de  $X_A$  a  $X_B$ ), y la potencia máxima de sincronización pasa de  $P_A$  a



P, pasando de la senoide A a la B (fig. 11). Como se supone que el par mecánico se mantiene constante, éste será igual a  $T_{a0}$  y el caso crítico vendrá determinado por la igualdad de las áreas rayadas (fig. 11).

Considerando varios casos críticos para distintos valores de  $\delta_{a0}$  y determinando los correspondientes va-

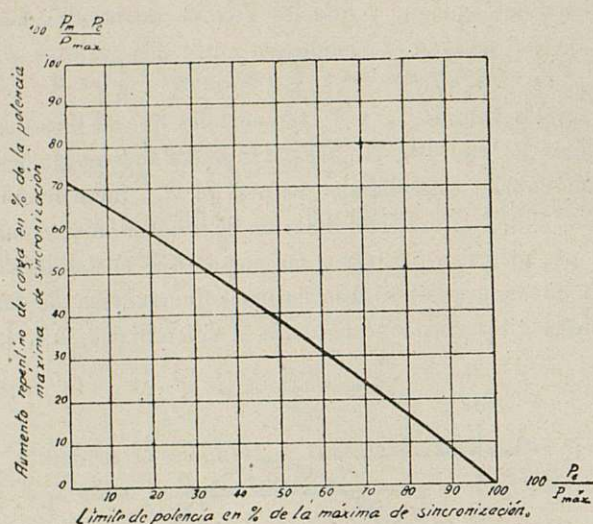


Gráfico 1.—Límite de la potencia para admitir aumentos repentinos de carga.

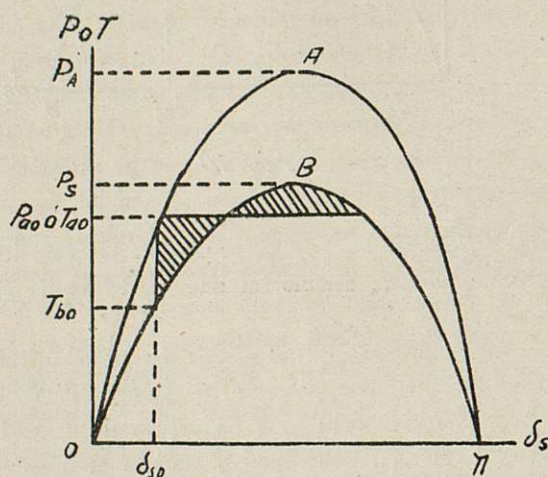


Fig. 11

lores de  $P_{a0}/P_B$ ,  $P_B/P_A$  y  $P_{a0}/P_A$ , se ha preparado el gráfico 2, el cual sirve para determinar el límite de potencia cuando hay un cambio repentino de conexiones en la red, como, por ejemplo, al desconectar un circuito de interconexión.

Para analizar los casos de cortocircuito recurrir-

mos al método de las «Componentes Simétricas»<sup>16, 17, 18, 19 y 20</sup>, del cual se da una sucinta idea en el Apéndice I.

Si durante un cortocircuito consideramos todas las corrientes y tensiones de la red descompuestas, según este método, tendremos las tres componentes: directa, inversa y homopolar, y podremos observar que las corrientes de componente directa son las únicas que producen dentro de las máquinas un campo que gira en el mismo sentido que el rotor y, por lo tanto, las únicas que pueden dar par; luego, en lo que afecta a la estabilidad de las máquinas, sólo hay que tener en cuenta las corrientes de componente directa.

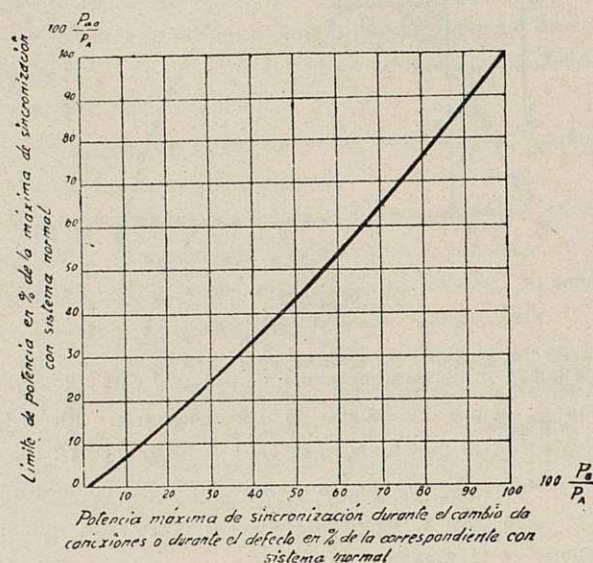


Gráfico 2.—Límite de potencia para permitir desconectar un circuito de interconexión o para aguantar permanentemente un defecto.

Al pasar de las condiciones normales a las de cortocircuito, lo único que variará en la fórmula (18) será la reactancia de sincronización, por establecerse un contacto asimétrico en el punto del defecto. Si el cortocircuito es trifásico, las tensiones en el punto del defecto serán nulas; pero si se trata de un defecto bifásico o monofásico, quedará tensión en el defecto. Esta tensión se tiene en cuenta añadiendo en la red de componente directa una reactancia adecuada «shuntando» a tierra el punto del defecto<sup>14</sup>.

Puede suponerse que en la interconexión de las dos máquinas no existe la derivación a tierra indicada en la figura 8, pues ésta puede suprimirse por el método que se indica en el Apéndice II. Así, la figura 12



demuestra cómo queda modificada la reactancia de sincronización entre las dos máquinas:  $X_k$  es una reactancia trifásica equilibrada que «shunta» a tierra las tres fases en el punto del defecto y su valor determi-

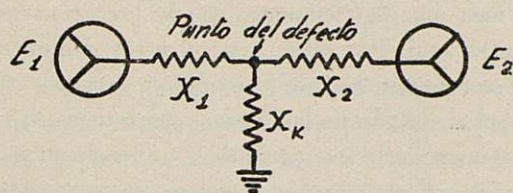


Fig. 12

na la clase de defecto en la forma que se indica más adelante; así el sistema que interconecta las dos máquinas continúa siendo trifásico equilibrado. La influencia de  $X_k$  en la reactancia de sincronización viene determinada (según la fórmula 11) como sigue:

Antes del defecto se tiene como reactancia de sincronización:

$$X_A = X_1 + X_2 \quad (20)$$

y como potencia máxima de sincronización:

$$P_A = \frac{E_1 E_2}{X_A} \quad (21)$$

Durante el defecto, la reactancia de sincronización vale:

$$X_B = X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_k} \quad (22)$$

y la potencia máxima de sincronización es:

$$P_B = \frac{E_1 E_2}{X_B} \quad (23)$$

De las fórmulas (20 y 22) se desprende que cuanto menor sea  $X_k$  mayor será el aumento que experimentará la reactancia de sincronización y, por lo tanto, mayor será la perturbación de la marcha en paralelo. Según la aplicación de la teoría de las «Componentes Simétricas» al cálculo de cortocircuitos, el valor de esta reactancia «shunt»  $X_k$  para las distintas clases de defectos viene determinado en la forma siguiente:

*Para una fase a tierra.*—La reactancia «shunt», equivalente al defecto, debe ser igual a las reactancias in-

versa y homopolar en el punto del defecto conectadas en serie.

$$X_k = X_1 + X_h \quad (24)$$

*Para cortocircuito entre dos fases.*—Debe ser igual a la reactancia inversa en el punto del defecto.

$$X_k = X_1 \quad (25)$$

*Para dos fases a tierra.*—Debe ser igual a las reactancias inversa y homopolar en el punto del defecto conectadas en paralelo.

$$X_k = \frac{X_1 X_h}{X_1 + X_h} \quad (26)$$

*Para cortocircuito trifásico.*—Debe ser nula, es decir, equivalente a «shuntar» directamente a tierra la red de componente directa en el punto del defecto.

$$X_k = 0 \quad (27)$$

Obsérvese que estos defectos se han nombrado por orden ascendente de la perturbación que causan en la marcha en paralelo.

Como el efecto del cortocircuito se reduce a una disminución de la potencia máxima de sincronización (fórmulas 20, 21, 22 y 23) habrá un paso repentino de la senoide A a la B (fig. 11), como si se tratase de la desconexión de un circuito, y mediante el gráfi-

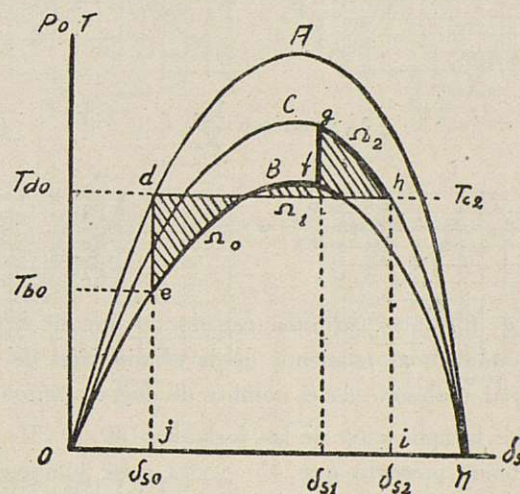


Fig. 13.

co 2 se podrá determinar el límite de potencia en tanto por 100 para aguantar el cortocircuito permanente sin perder el sincronismo.

Al desconectarse automáticamente el o los circui-



tos que tienen el defecto, si éstos interconectan las dos máquinas, la reactancia de sincronización quedará superior a la de antes de presentarse el defecto y entonces deberemos considerar las tres senoides A, B y C (fig. 13). En el momento de eliminarse el cortocircuito, pasaremos del punto *f* de la senoide B al *g* de la C y para que haya estabilidad es preciso que  $\Omega_0$  (fig. 13) sea menor o todo lo más igual que  $\Omega_1 + \Omega_2$ , y el caso crítico tendrá lugar cuando  $\Omega_0 = \Omega_1 + \Omega_2$ , o sea, cuando el área *jefgl* sea igual a la del rectángulo *jdhi*. Expresando esta igualdad matemáticamente se tiene:

$$T_{a0}(\delta_{s2} - \delta_{s0}) = \int_{\delta_{s0}}^{\delta_{s1}} T_B \sin \delta_s \delta_s + \int_{\delta_{s1}}^{\delta_{s2}} T_C \sin \delta_s \delta_s \quad (28)$$

resolviendo las integrales, encontraremos

$$T_{a0}(\delta_{s2} - \delta_{s0}) = T_B (\cos \delta_{s0} - \cos \delta_{s1}) + T_C (\cos \delta_{s1} - \cos \delta_{s2}) \quad (29)$$

despejando  $\cos \delta_{s1}$  y pasando de pares a potencias, se obtiene:

$$\cos \delta_{s1} = \frac{P_{a0}(\delta_{s2} - \delta_{s0}) - P_B \cos \delta_{s0} - P_C \cos (\pi - \delta_{s2})}{P_C - P_B} \quad (30)$$

o bien:

$$\cos \delta_{s1} = \frac{\frac{P_{a0}}{P_A} (\delta_{s2} - \delta_{s0}) - \frac{P_B}{P_A} \cos \delta_{s0} - \frac{P_C}{P_A} \cos (\pi - \delta_{s2})}{\frac{P_C}{P_A} - \frac{P_B}{P_A}} \quad (31)$$

en las que:

$$\delta_{s0} = \arcsen \frac{P_{a0}}{P_A} \quad (32)$$

$$\delta_{s2} = \pi - \arcsen \frac{P_{a0}}{P_A} = \pi - \arcsen \frac{\frac{P_{a0}}{P_A}}{\frac{P_C}{P_A}} \quad (33)$$

Estas fórmulas permiten calcular el ángulo  $\delta_{s1}$  correspondiente al momento de la eliminación del defecto, al cual se le da el nombre de *ángulo crítico*.

Para la aplicación de las fórmulas (30) o (31) hay que tener presente que  $\delta_{s2} - \delta_{s0}$  debe tomarse en radianes.

Si el defecto es en un circuito radial, la reactancia de sincronización, una vez localizado el cortocircuito, será la misma que la de antes de presentarse el defecto; esto es, tendremos que  $X_C = X_A$  y la senoide C coincidirá con la A (figura 13), subsistiendo las

fórmulas (30, 31, 32 y 33), en las que tendremos  $P_C = P_A$ .

Para tener en cuenta las resistencias óhmicas, este método de las áreas se puede generalizar con alguna simplificación<sup>7</sup>; pero como esto no trae consigo ninguna idea más del fenómeno, no se cree conveniente detallarlo aquí. Por otra parte, el error debido a suponer constantes las excitaciones no se puede remediar con el método de las áreas, y para tener en cuenta la influencia de los reguladores de tensiones es preciso apelar al método de las etapas sucesivas (Apartado B — e).

#### d) DETERMINACIÓN DEL TIEMPO.

En el apartado anterior hemos estudiado la primera oscilación en el caso ideal de dos máquinas, tomando como variable independiente el desplazamiento angular  $\delta_s$  entre los dos rotores; vamos ahora a introducir la variable tiempo *t*, admitiendo las mismas hipótesis simplificadoras que en dicho apartado.

Empleando el sistema de unidades de tanto por uno (Apéndice IV) la relación que existe entre el par resultando  $T_r$  en el rotor de una máquina, el desplazamiento angular del mismo  $\delta$  referido al campo giratorio y la constante de inercia *M*, es la siguiente (véase Apéndice IV):

$$\frac{M}{2\pi f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_r \quad (34)$$

Cuando hay equilibrio entre el par motor y el resistente,  $T_r$  es nulo; pero en el momento de producirse un desequilibrio entre estos dos pares, se producirá el desplazamiento angular correspondiente determinado por la ecuación (34).

Supongamos ahora el caso ideal de dos máquinas del apartado anterior, en el que se presenta un desequilibrio entre estos pares debido a un cambio brusco de condiciones (fig. 11), como, por ejemplo, a un cortocircuito, pasando repentinamente de la senoide A a la B. Aplicando la ecuación (34) a las máquinas 1 y 2, recordando que la máquina 1 es un generador y la 2 un motor y que la figura 11 representa indistintamente estas dos máquinas, tendremos:

$$\frac{M_1}{2\pi f} \cdot \frac{d^2\delta_1}{dt^2} = T_{a0} - T_B \sin \delta_s \quad (35)$$

$$\frac{M_2}{2\pi f} \cdot \frac{d^2\delta_2}{dt^2} = T \sin \delta_s - T_{a0} \quad (36)$$



Sumando (35) y (36):

$$\frac{M_1}{2\pi f} \cdot \frac{d^2\delta_1}{dt^2} + \frac{M_2}{2\pi f} \cdot \frac{d^2\delta_2}{dt^2} = 0$$

$$M_1 \frac{d^2\delta_1}{dt^2} = -M_2 \frac{d^2\delta_2}{dt^2} \quad (38)$$

lo que nos dice que el rotor de una máquina se avanza y el de la otra se atrasa y que las aceleraciones angulares respectivas, positiva la una y negativa la otra, son inversamente proporcionales a las constantes de inercia.

Por otro lado se tiene:

$$\delta_1 - \delta_2 = \delta_s \quad (39)$$

Eliminando  $\delta_1$  y  $\delta_2$  del sistema de ecuaciones (35), (36) y (39), se tiene:

$$\frac{d^2\delta_s}{dt^2} = \left( \frac{2\pi f}{M_1} + \frac{2\pi f}{M_2} \right) (T_{a0} - T_B \sin \delta_s) \quad (40)$$

$$\frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \cdot \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{d^2\delta_s}{dt^2} = T_{a0} - T_B \sin \delta_s \quad (41)$$

Si hacemos

$$\frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} = M_s \quad (42)$$

la (41) se transforma en:

$$\frac{M_s}{2\pi f} \cdot \frac{d^2\delta_s}{dt^2} = T_{a0} - T_B \sin \delta_s \quad (43)$$

La mejor interpretación física de esta ecuación la obtendremos al imaginarnos que la constante de inercia de la máquina 2 se hace infinita y que la de la máquina 1 se iguala a  $M_s$ . Entonces, según la (38), tendremos  $\delta_2 = 0$  y como  $M_1 = M_s$ , si comparamos las ecuaciones (35) y (43), tendremos  $\delta_1 = \delta_s$ , lo que indica que la máquina 2 quedará sin oscilar y la 1 quedará substituída por otra máquina ficticia, conservando las mismas características; pero de constante inercia  $M_s$ , cuya oscilación equivaldrá a la relativa entre las dos máquinas.

Como se admite proporcionalidad entre potencias y pares, multiplicando ambos miembros de la (43) por la velocidad angular de funcionamiento normal pasaremos de pares a potencias, y si se tiene en cuenta que empleando el sistema de unidades de tanto por

uno, dicha velocidad angular es la unidad, obtendremos la ecuación:

$$\frac{M_s}{2\pi f} \cdot \frac{d^2\delta_s}{dt^2} = P_{a0} - P_B \sin \delta_s \quad (44)$$

en la que  $P_{a0}$ ,  $P_B$  y  $M_s$  vienen medidas con la misma potencia base.

Dividiendo ambos miembros de la (44) por  $P_B$  se obtiene:

$$\frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{M_s}{P_B} \cdot \frac{d^2\delta_s}{dt^2} = \frac{P_{a0}}{P_B} - \sin \delta_s \quad (45)$$

Haciendo:

$$t \sqrt{2\pi f \frac{P_B}{M_s}} = \tau \quad (46)$$

$$dt^2 = \frac{1}{2\pi f \frac{P_B}{M_s}} d\tau \quad (47)$$

y cambiando la variable  $t$  por la  $\tau$  en la (45), obtendremos la ecuación:

$$\frac{d^2\delta_s}{d\tau^2} + \sin \delta_s = \frac{P_{a0}}{P_B} \quad (48)$$

La ecuación de esta forma ha sido resuelta mediante un aparato que integra gráficamente ciertas ecuaciones diferenciales inventado por el profesor doctor

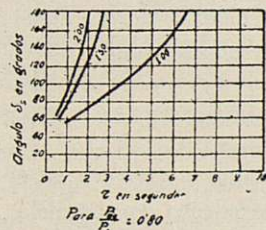
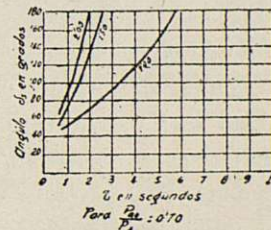
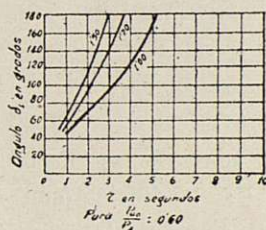
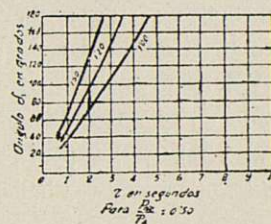
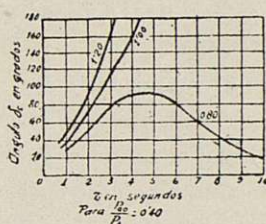


Gráfico 3. Curvas relacionando el desplazamiento angular  $\delta_s$  y el tiempo base  $\tau$ . Las curvas son para los valores  $\frac{P_{a0}}{P_B}$ , que se indican al lado de las mismas,



Busch y otros, como fruto de varios años de incesantes investigaciones en el Instituto Tecnológico de Massachusetts <sup>21, 22 y 23</sup>.

El gráfico 3 resume los resultados de la integración de la ecuación (48) para distintos valores iniciales de  $\delta_{s0}$  y de  $\frac{P_{a0}}{P_B}$ . Téngase en cuenta que, según la fórmula (32),  $\delta_{s0}$  viene determinado en función de  $\frac{P_{a0}}{P_A}$  y en este gráfico figuran los valores de  $\frac{P_{a0}}{P_A}$  en lugar de  $\delta_{s0}$ .

En el trabajo de Summers y Clure <sup>11</sup> se encuentran gráficos detallados de esta integración.

Sustituyendo el de  $P_B$ , que da la fórmula (23) en la (46), se obtiene:

$$t = \frac{\tau}{\sqrt{2\pi f \frac{P_B}{M_s}}} = \frac{\tau}{\sqrt{\frac{2\pi f}{M_s} \frac{E_1 E_2}{X_B}}} \quad (49)$$

en la que  $P_B$ ,  $M_s$  y  $X_B$  vienen medidos con la misma potencia base.

La proporcionalidad que existe entre  $t$  y  $\tau$  (fórmula 49), sólo depende de las constantes del sistema, mientras que la ecuación (48) es independiente de estas constantes y, por lo tanto, su integración no tendrá que repetirse para cada caso particular.

Volviendo al caso general de un cortocircuito estudiado en el apartado anterior (fig. 13), las fórmulas (30), (31), (32) y (33) permiten determinar el ángulo crítico  $\delta_{s1}$  y una vez hallado el tiempo base correspondiente  $\tau_1$ , mediante las citadas curvas, la fórmula (49) nos dará el tiempo crítico  $t_1$  de eliminación del defecto.

En la parte (D) se expone un ejemplo de cálculo de límite de potencia y se podrán fijar ideas de esta teoría con su aplicación a un caso concreto.

Esta teoría es un complemento del método de las áreas, y en su desarrollo hemos admitido las mismas hipótesis. Para tener en cuenta las resistencias óhmicas puede también generalizarse a este solo efecto, admitiendo algunas simplificaciones <sup>7</sup>; pero por las mismas razones ya expuestas en el método de las áreas, tampoco se cree adecuado desarrollarlo aquí.

#### e) MÉTODO DE LAS ETAPAS SUCESIVAS.

Como son muchos los factores que intervienen en el estudio de la estabilidad de la marcha en paralelo,

en el método de las áreas descrito anteriormente, se han admitido unas hipótesis simplificativas con el fin de que no figurasen en los cálculos aquellos factores que más lo complican y que más nos estorban para formarnos idea del fenómeno. Pero si bien entre estos factores hay algunos que nos conducen a errores generalmente despreciables, no hay que perder de vista que hay otros, como, por ejemplo, el efecto de los reguladores de tensión, que nos conducen a errores que, en ciertos casos, no son admisibles en la práctica. Sin embargo, debemos añadir que el estudio de la estabilidad de un sistema, en la mayoría de los casos, se efectúa para determinar el límite de potencia de una de sus partes o de su totalidad, y, en tal caso, al suponer las excitaciones constantes, nos dará un límite inferior al real y, por lo tanto, habrá casos que podrán resolverse por el método de las áreas.

El método que ahora vamos a describir presenta la ventaja de ser mucho más exacto; en cambio, nos conduce a cálculos muy laboriosos. Por esto puede considerarse que su aplicación entre de lleno con el empleo de una red miniatura.

La idea del método de las etapas sucesivas <sup>24</sup> consiste en dividir el tiempo en varios intervalos o etapas iguales lo suficientemente pequeñas para que en su duración puedan admitirse algunos factores como constantes, la variabilidad de los cuales se tendrá en cuenta mediante un salto brusco en el instante de pasar

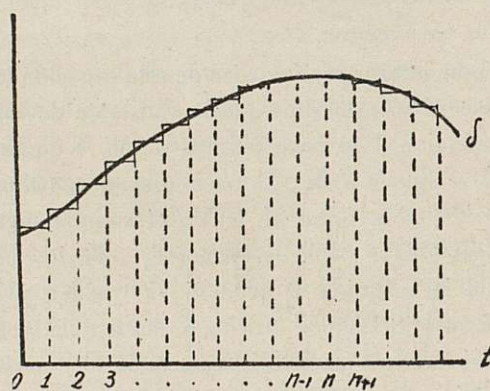


Fig. 14

de una etapa a la siguiente. Así, la curva de la figura 14 queda substituída por la línea quebrada, en la que en cada etapa 0-1, 1-2, 2-3, etc., el desplazamiento angular  $\delta$  de cualquier máquina se mantiene constan-



te y en cada instante 1, 2, 3, etc., sufre repentinamente el incremento correspondiente a las referidas etapas. Por lo general, se obtiene una aproximación más que suficiente tomando las etapas de 0,05 segundos.

En este método se supone que las condiciones de funcionamiento de las máquinas, en lugar de variar en forma continua, varían bruscamente en el momento de pasar de una etapa a la siguiente. Así, en el instante  $n$  (fig. 15), el desplazamiento angular  $\delta$  de cada máquina sufre el incremento  $\Delta\delta_n$  correspondiente a la etapa  $(n-1) n$ , y el cambio de funcionamiento que en consecuencia experimentará cada máquina traerá

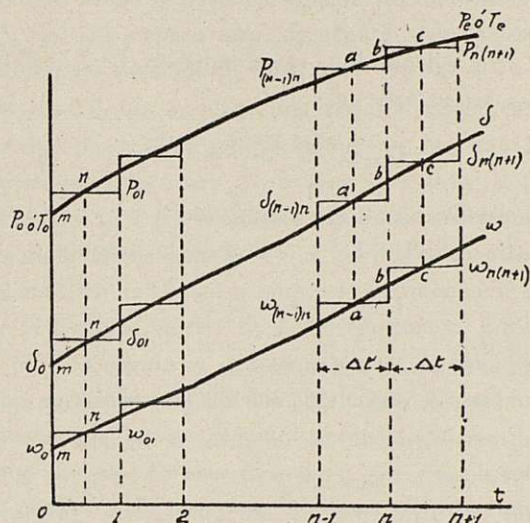


Fig. 15

consigo un incremento de la potencia eléctrica  $P_e$  y de la corriente en fase  $I_d$ .

Los incrementos del desplazamiento angular  $\delta$  (en grados sexagesimales) en los instantes  $n$  y  $n + 1$  (figura 15) están ligados por la relación siguiente (deducida en el Apéndice V):

$$\Delta\delta_{n+1} = \Delta\delta_n + \frac{360/\Delta t^2}{M} \left( P_m - \frac{P_{(n-1)n} + P_{n(n+1)}}{2} \right) \quad (50)$$

Si suponemos no existen circuitos amortiguadores o despreciamos sus efectos, como el cambio de funcionamiento que experimenta cada máquina en el paso de una etapa a la siguiente es instantáneo, la tensión interior transitoria se mantendrá constante <sup>25</sup>, y de

ello se deducen (Apéndice V) las siguientes relaciones correspondientes al instante  $n$ :

$$\Delta E_{d,n} = (x_d - x'_d) \Delta I_{d,n} \quad (51)$$

$$\Delta E_{q,n} = (x_q - x'_d) \Delta I_{d,n} \quad (52)$$

Durante cada etapa, la tensión de excitación será

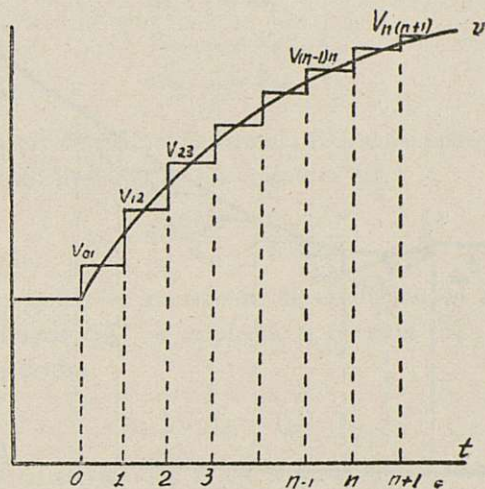


Fig. 16

constante (fig. 16), pero no la corriente de excitación. Esto se comprende como sigue:

En toda variación instantánea de la corriente del inducido, circula por el circuito inductor una corriente transitoria para que el flujo que atraviesa este circuito se conserve constante en los primeros instantes <sup>25</sup>; esta corriente transitoria viene determinada por una función exponencial decreciente y a medida que se amortigua entra en vigor el efecto de reacción de inducido. Cuando haya transcurrido tiempo suficiente para considerar que dicha corriente transitoria se haya anulado prácticamente, la corriente de excitación se conservará constante.

La constante de decrecimiento  $T_d$  de esta corriente transitoria está comprendida generalmente entre 0'5 y 2'5 segundos <sup>15</sup>.

Luego, debido a la corta duración de cada etapa, la corriente transitoria que circula por el inductor al principiar la etapa todavía no se habrá anulado al terminarla. Como adoptamos el sistema de unidades de tanto por uno, las tensiones interiores sincrónicas  $E_d$  vendrán medidas por el mismo valor que las corrientes totales de excitación y, según se deduce en el



Apéndice V, el valor de esta tensión al terminar la etapa  $n(n+1)$  viene determinada por:

$$E_{d(n+1)} = E_{dn} + \Delta E_{dn} - (E_{dn} + \Delta E_{dn} - v_{n(n+1)}) \frac{\Delta t}{T_d} \quad (53)$$

La figura 17 representa la línea quebrada formada por las tensiones interiores sincrónicas al seguir las sucesivas etapas.

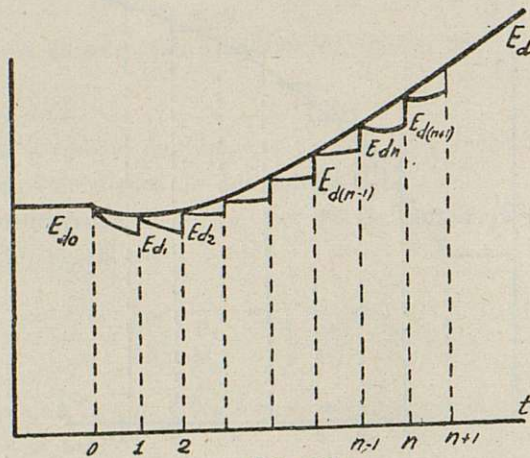


Fig. 17.

La tensión interior transitoria y la tensión interior detrás de la reactancia en cuadratura sufren durante cada etapa un incremento igual al de la tensión interior sincrónica (véase Apéndice V).

En el caso ideal de dos máquinas 1 y 2 sin existir derivaciones intermedias y suponiendo constantes las tensiones interiores de la máquina 2, la constante de decrecimiento  $T_{1d}$  de la máquina 1 vale (véase Apéndice VI):

$$T_{1d} = \frac{X'_d}{X_d} T_{1d0} \quad (5)$$

Para el caso de dos máquinas 1 y 2, considerando la 2 con tensión  $E_2$  constante, pero teniendo en cuenta las resistencias óhmicas y existiendo derivaciones intermedias, la (54) se transforma en (véase Apéndice VI):

$$T_{1d} = \frac{R_{11}^2 + X'_{11dq} X_{11qq}}{R_{11}^2 + X_{11dq} X_{11qq}} T_{1d0} \quad (55)$$

En el caso real de varias máquinas, el problema es muy complicado (Apéndice VI), pues el decrecimiento de cualquiera de ellas viene ligado con el de las de

más y hay que considerar a cada máquina como una parte de todo el sistema. Sin embargo, la solución práctica consiste en determinar la constante de decrecimiento de una máquina, suponiendo constantes las tensiones interiores de las demás (Apéndice VI), resultando:

$$T_d = \frac{R_{ii} + X'_{iiaq} X_{iiaq}}{R_{ii} + X_{iiaq} X_{iiaq}} T_{d0} \quad (56)$$

Fórmula que, como veremos en el apartado (C-d), es de fácil transformación para ser aplicada en una red miniatura.

Vamos ahora a indicar someramente el camino a seguir para la determinación de la etapa  $n(n+1)$  de una máquina en el caso de emplear una red en miniatura:

1.º Del cálculo de la etapa anterior  $(n-1)n$ , tendremos los valores de

$$\delta_{(n-1)n}, P_{(n-1)n}, E_{dn} \text{ y } E_{Qn}.$$

2.º La fórmula (50), cambiando  $n$  por  $n-1$ , nos permitirá calcular  $\Delta\delta_n$  y aplicando la fórmula

$$\delta_{n(n+1)} = \delta_{(n-1)n} + \Delta\delta_n \quad (57)$$

determinaremos el valor de  $\delta_{n(n+1)}$ .

3.º Las fórmulas (51) y (52) nos permiten calcular  $\Delta E_{dn}$  y  $\Delta E_{Qn}$  respectivamente, ya que si conocemos el valor de  $\Delta\delta_n$   $E_{Qn}$  para cada máquina, la red miniatura nos permite medir el valor de  $\Delta I_{dn}$  (véase parte C).

4.º Al empezar la etapa  $n(n+1)$ , tendremos para la excitación o tensión interior sincrónica el valor  $E_{dn} + \Delta E_{dn}$  y al terminar la etapa, este valor se habrá convertido en  $E_{d(n+1)}$  el cual puede determinarse mediante la fórmula (53).

La constante de decrecimiento  $T_d$  sólo pasará por dos valores distintos en todo el fenómeno: uno durante el cortocircuito y el otro después de la eliminación del mismo. Estos valores se calcularán una sola vez para todas las etapas aplicando la fórmula (56) en la forma que se indica en la parte C.

5.º Durante la etapa  $n(n+1)$ , la tensión interior  $E_Q$  detrás de la reactancia en cuadratura sufrirá un incremento igual al de la tensión interior sincrónica.

6.º Los incrementos  $\Delta E_{d(n+1)}$  y  $\Delta E_{Q(n+1)}$  se calcularán análogamente que  $\Delta E_{dn}$  y  $\Delta E_{Qn}$ , cuyo procedimiento se indica en el punto 3.º



7.º Conociendo  $\delta_{n(n+1)}$  y el valor de  $E_Q$  para cada máquina, con la red miniatura se puede determinar  $P_{n(n+1)}$ .

Téngase en cuenta que al empezar la etapa, el valor de  $E_Q$  es  $E_{Qn} + \Delta E_{Qn}$  y al terminarla pasa a ser  $E_{Q(n+1)}$ ; luego para determinar  $P_{n(n+1)}$  será más exacto tomar como tensión interior de cada máquina el valor medio:

$$\frac{E_{Qn} + \Delta E_{Qn} + E_{Q(n+1)}}{2} \quad (58)$$

8.º El incremento  $\Delta\delta_{n+1}$  se hallará aplicando la fórmula (50).

9.º Cualquier cambio de posición del regulador de velocidad puede tenerse en cuenta variando el valor de  $P_m$  de una etapa a otra, de acuerdo con las características del regulador.

En caso de no emplear una red en miniatura, sin duda que puede aplicarse el método de las etapas sucesivas; pero la labor a efectuar será muy larga y pesada. En tal caso simplificaríamos el problema reduciéndolo al caso ideal de dos máquinas 1 y 2, despreciando las resistencias óhmicas y suponiendo constante la tensión interior  $E_2$  de la máquina 2. Entonces el camino a seguir es el mismo que el indicado para la red en miniatura, con las siguientes observaciones:

1.º Al aplicar la fórmula (50) debe hacerse dando a  $M$  el valor de  $M_s$  y entonces nos dará los incrementos  $\Delta\delta_s$  del desplazamiento angular entre los rotores de las máquinas 1 y 2.

2.º Para el cálculo de los incrementos  $\Delta E_{1dn}$  y  $\Delta E_{1Qn}$  deben emplearse las fórmulas siguientes (deducidas en el Apéndice V):

$$\Delta E_{1dn} = \frac{x_{1d} - x'_{1d}}{X'_d} E_2 \sin \delta_{s(n-1)n} \Delta\delta_{sn}$$

$$\Delta E_{1Qn} = \frac{x_{1q} - x'_{1d}}{X'_d} E_2 \sin \delta_{s(n-1)n} \Delta\delta_{sn}$$

3.º Los dos valores de la constante de decrecimiento  $T_d$  se determinarán aplicando la fórmula (54).

4.º La potencia eléctrica  $P_{n(n+1)}$ , se determinará mediante la fórmula (16) aplicada a este caso particular; resultando:

$$P_{n(n+1)} = \frac{E_{1Q} E_2}{X_q} \sin \delta_{sn(n+1)} \quad (59)$$

Para  $E_{1Q}$  tomaremos el promedio de la tensión inte-

rior detrás de la reactancia en cuadratura durante la etapa  $n(n+1)$ , cuyo valor es:

$$E_{1Q} = \frac{E_{1Qn} + \Delta E_{1Qn} + E_{1Q(n+1)}}{2} \quad (60)$$

Para la primera etapa se tiene (fig. 15):

$$\left. \begin{aligned} \Delta\delta_n &= 0 \\ \Delta\delta_{n+1} &= \Delta\delta_1 \\ P_{(n-1)n} &= P_0 \\ P_{n(n+1)} &= P_{01} \end{aligned} \right\} \quad (61)$$

y en lugar de aplicar la fórmula (50) debe aplicarse la siguiente (deducida en el Apéndice V):

$$\Delta\delta_1 = \frac{360f\Delta t^2}{M} \cdot \frac{P_m - P_0}{2} \quad (62)$$

Para hallar el incremento de excitación en el instante inicial  $\Delta E_{d0}$  se empleará la fórmula (51), en la que se tendrá:

$$\Delta I_{a..} = \Delta I_{d0} = I_{dc} - I_{da} \quad (63)$$

siendo  $I_{dc}$  el valor de  $I_d$  en el instante de presentarse el cortocircuito e  $I_{da}$  el que había antes de este cortocircuito.

En el instante de eliminarse el defecto habrá una discontinuidad. Si ésta coincide con un final de eta-

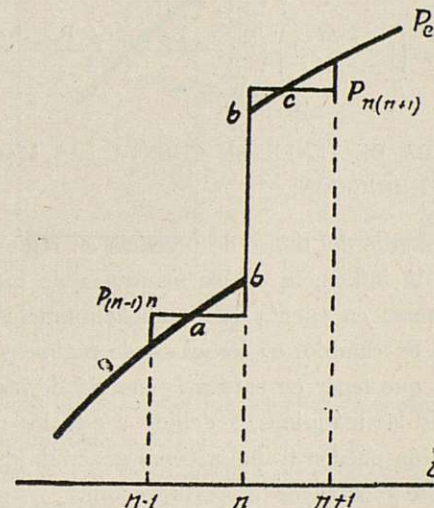


Fig. 18

pa (fig. 18), según el procedimiento seguido en el Apéndice V, es fácil ver que la fórmula (51) subsiste. Pero, por lo general, no se dará esta coincidencia, y entonces, para que la discontinuidad coincida con el



instante  $n$  final de una etapa, habrá necesidad de dar a la etapa  $(n - 1)n$  una duración diferente de las demás.

En todo lo anterior se ha despreciado el efecto de los circuitos amortiguadores. El efecto eléctrico de los mismos es prácticamente despreciable, ya que la constante de decrecimiento de las corrientes transitorias que circulan por estos circuitos es del orden de 0'05 segundos, mientras que las correspondientes al circuito de excitación, ya se ha dicho, está comprendida entre 0'5 y 2'5 segundos. De querer tener en cuenta estos circuitos, habrían de tomarse las reactancias subtransitorias en lugar de las transitorias <sup>15</sup>, y, además de esto, el problema se nos complica por ser preciso tener en cuenta la influencia de la corriente transitoria que circula por los circuitos amortiguadores desde el instante del cambio de condiciones hasta amortiguarse.

El efecto mecánico de los circuitos amortiguadores puede tenerse en cuenta admitiendo que el par amortiguador es proporcional a la velocidad relativa entre el rotor y el campo giratorio. Llamando  $F$  al coeficiente de esta proporcionalidad, es fácil deducir <sup>14</sup>, por un camino análogo al del Apéndice V, que la fórmula (50) queda reemplazada por:

$$\Delta\delta_{n+1} = \left(1 - \frac{\Delta t}{M} F\right) \Delta\delta_n + \frac{360/\Delta t^2}{M} \left(1 - \frac{\Delta t}{2M} F\right) \left(P_m - \frac{P_{(n-1)n} + P_{n(n+1)}}{2}\right) \quad (64)$$

#### f) MANERA DE TENER EN CUENTA LAS MÁQUINAS DE INDUCCIÓN.

En el estudio del límite de potencia en régimen permanente, la influencia de las máquinas de inducción puede tenerse en cuenta mediante admitancia en derivación; en cambio, en los casos de régimen perturbado hay que tener en cuenta la inercia de las partes móviles de las máquinas, y debido a esto los motores de inducción pueden trabajar como generadores en los primeros momentos de la perturbación.

Debido a que la inductancia del rotor de una máquina de inducción es baja comparada con la del circuito de excitación de una máquina sincrónica, la constante de decrecimiento de la corriente transitoria que dan aquellas máquinas en una perturbación es más baja que la correspondiente a la corriente transitoria de una máquina sincrónica, y su valor es, más

bien comparable con la constante de decrecimiento de la corriente subtransitoria.

Como en los métodos expuestos no se tienen en cuenta las corrientes subtransitorias por su baja constante de crecimiento (del orden de 0,05 segundos), la reactancia transitoria de las máquinas de inducción sólo influye en las corrientes inversas, y para las corrientes directas sólo debe tenerse en cuenta la reactancia sincrónica de las mismas.

Así, para tener en cuenta la influencia de las máquinas de inducción, las substituiremos por otras máquinas sincrónicas ficticias, cuyas características obedecerán a lo siguiente:

1.º Las reactancias directa e inversa de la máquina sincrónica ficticia que substituye a una máquina de inducción serán, respectivamente, la reactancia sincrónica y transitoria de ésta.

2.º Los valores de las reactancia de una máquina de inducción son, en general, del orden del 300 por 100 la sincrónica, y del 15 por 100 la transitoria <sup>14</sup>.

#### g) LAS OSCILACIONES PENDULARES DE AMPLITUD CRECIENTE.

Este fenómeno ya fué observado en 1911 por L. Dreyfus, en Alemania, y más tarde por Wennerberg <sup>26</sup>, en Suecia. En 1930, Nickle and Pierce y C. L. Wagner <sup>25</sup>, en los Estados Unidos, efectuaron estudios analíticos, indicando las características del fenómeno en los casos más corrientes.

Para dar una idea del fenómeno consideraremos el caso teórico de una máquina 1 sin circuitos amortiguadores y sin pérdidas conectada a una fuente de tensión constante  $E_2$ , mediante un circuito de reactancia  $X_2$  y resistencia óhmica  $R_2$ .

En el Apéndice VII se deduce que cuando el rotor de una tal máquina entra en oscilación, admitiendo que el desplazamiento angular  $\delta_s$  sufre un incremento  $\Delta\delta_s$  función senoidal del tiempo, el incremento  $\Delta E'_{1d}$  de la tensión transitoria, si suponemos constante la tensión de excitación, es también función senoidal del tiempo con un decalaje retrasado, y de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$\Delta\delta_s = \Delta\delta_{sm} \sin \frac{2\pi}{T_p} t \quad (65)$$

$$\Delta E'_{1d} = \Delta E'_{1dm} \sin \left( \frac{2\pi}{T_p} t - \beta \right) \quad (66)$$



$$\Delta E'_{1dm} = \frac{E_2}{\sqrt{1 + \left(2\pi \frac{T_{1d}}{T_p}\right)}} \frac{X_{dl} - X'_d}{R^2 + X_d X_q} (R \cos \delta_s - X_q \sin \delta_s) \Delta \delta_{sm} \quad (67)$$

$$\operatorname{tg} \beta = 2\pi \frac{T_{1d}}{T_p} \quad (68)$$

Las dos funciones senoidales (65) y (66), por no estar en fase, determinarán un ciclo elíptico (fig. 19). Si  $\Delta E'_{1dm}$  y  $\Delta \delta_{sm}$  son del mismo signo, como  $\Delta'_{1d}$  está

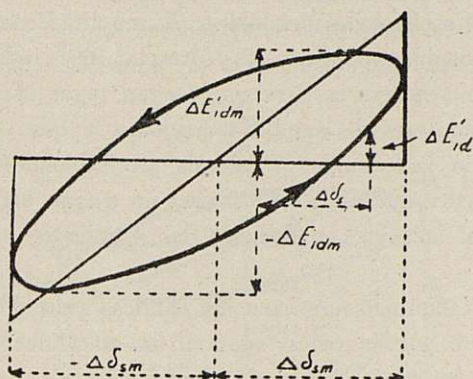


Fig. 19

retrasado de  $\Delta \delta_s$ , el ciclo es recorrido en sentido contrario a las agujas del reloj (fig. 19); pero si  $\Delta E'_{1dm}$  y  $\Delta \delta_{sm}$  son de signo contrario, el ciclo debe ser recorrido en el mismo sentido que el reloj (fig. 20).

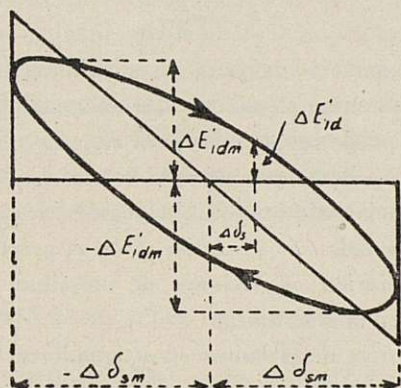


Fig. 20

Según la (67), estaremos en el caso de la figura 19, cuando

$$R \cos \delta_s - X_q \sin \delta_s > 0 \quad (69)$$

y estaremos en el caso de la figura 20, cuando

$$R \cos \delta_s - X_q \sin \delta_s < 0 \quad (70)$$

Si ahora consideramos la potencia eléctrica  $P_1$  de la máquina como una función de  $\delta_s$  y  $E'_{1d}$ , tendremos:

$$P_1 = F(\delta_s, E'_{1d}) \quad (71)$$

y

$$\Delta P_1 = \frac{\partial P_1}{\partial \delta_s} \Delta \delta_s + \frac{\partial P_1}{\partial E'_{1d}} \Delta E'_{1d} \quad (72)$$

La (72) nos dice que  $\Delta P_1$  está formado de dos partes, una que depende solamente de  $\Delta \delta_s$ , y otra que sólo depende de  $\Delta E'_{1d}$ . Si tomamos la curva de variación de  $P_1$  en función de  $\delta_s$  para  $E'_{1d}$  constante (fig. 21), esta curva nos indicará el primer término de la (72). En la figura 22 se amplifica la parte *aob* de esta curva (fig. 21) comprendida entre

$$-\Delta \delta_{sm} \quad \text{y} \quad +\Delta \delta_{sm}.$$

En el Apéndice VII se demuestra que en todas las condiciones prácticas de funcionamiento se tiene:

$$\frac{\partial P_1}{\partial E'_{1d}} > 0 \quad (73)$$

y, por lo tanto, el segundo término de la (72) será del mismo signo que  $\Delta E'_{1d}$ . El valor de este término de-

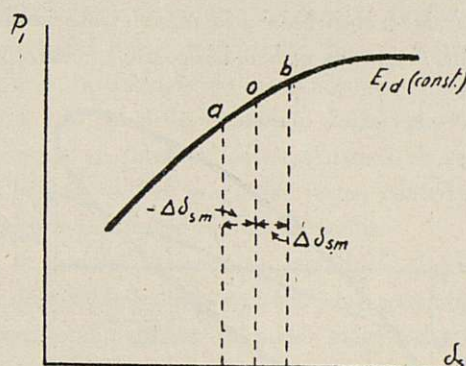


Fig. 21

termina una elipse, recorrida en el mismo sentido que la correspondiente a  $\Delta E'_{1d}$ .

Agregando a la curva de la figura 22 los correspondientes valores de

$$\frac{\partial P_1}{\partial E'_{1d}} \Delta E'_{1d} \quad (74)$$

tendremos la elipse de figuras 23 ó 24, según se cumpla la fórmula (69) ó (70), respectivamente.

Si admitimos proporcionalidad entre potencia y pares, los ciclos de figuras 23 y 24 representan también la



variación del par en cada oscilación. Los pares motor y resistente que actúan sobre el rotor eran iguales antes de la oscilación, y una vez empezada ésta, si admitimos que el par motor permanece constante, las or-

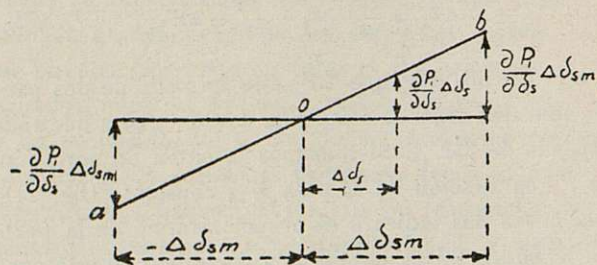


Fig. 22

denadas de los ciclos estudiados (figs. 23 y 24) determinan las diferencias entre estos dos pares, o sea el resultante  $T_r$ , que actúa sobre la masa giratoria. El área de estos ciclos, como resultado de la integral:

$$\int T_r d\delta_s \quad (75)$$

a lo largo de un ciclo completo, representa la energía suministrada o absorbida a la masa giratoria en cada oscilación. Como las ordenadas positivas corresponden

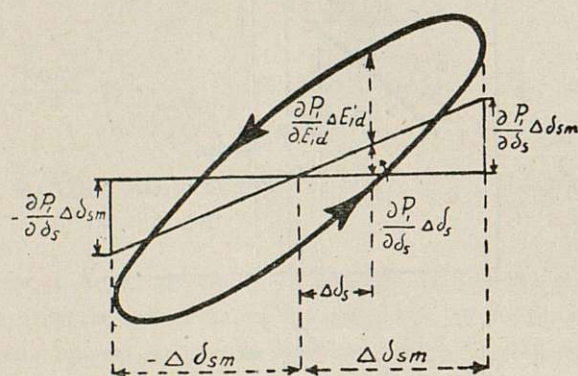


Fig. 23

cuando el par resistente supera al par motor, los valores positivos de la integral (75) representarán energía absorbida de la masa giratoria, y los valores negativos representarán energía suministrada.

Si se cumple la fórmula (70), el ciclo (fig. 24) es recorrido en el sentido de las agujas del reloj, y la integral (75) resulta de valor positivo, indicando que en cada ciclo se absorba energía de la masa giratoria,

lo que hará que cada oscilación vaya siendo de menor amplitud, constituyendo esto un amortiguamiento.

En cambio, si en lugar de cumplirse la fórmula (70) se cumple la (69), el ciclo (fig. 23) es recorrido en sentido contrario al del reloj, y la integral (75) resulta negativa, lo que significa que si hay en cada oscilación suministro de energía a la masa giratoria, ésta oscilará cada vez con mayor amplitud, formándose las oscilaciones pendulares, de amplitud creciente.

Si consideramos que la fórmula (69) indica la condición necesaria para que tengan lugar oscilaciones pendulares de amplitud creciente, y que, por el contrario, la fórmula (70) nos da precisamente la condición para que estas oscilaciones no tengan lugar, de todo lo anterior se deducen las siguientes conclusiones:

- 1.ª Cuando las resistencias óhmicas sean de valor suficiente pueden tener lugar en las máquinas oscilaciones pendulares de amplitud creciente.
- 2.ª Estas oscilaciones sólo pueden tener lugar con cargas bajas; por esto no se tienen en cuenta en la determinación de los límites de potencia (métodos c y e).
- 3.ª La carga crítica por debajo de la cual estas oscilaciones tienen teóricamente lugar, viene determinada por el desplazamiento angular  $\delta_s$ , y obedece a la fórmula

$$\omega \delta_s = \frac{R}{X_q} \quad (76)$$

- 4.ª En una máquina cuyas condiciones de funcionamiento permitan estas oscilaciones, tal funcionamiento no puede ser estable, pues aunque teóricamente podría suponerse que sostiene la marcha en paralelo, ésta estaría bajo un equilibrio inestable, igual que un cono apoyado por el vértice, y en la práctica siempre se iniciarían oscilaciones de amplitud creciente hasta perder el sincronismo.

La presencia de circuitos amortiguadores tiene por objeto absorber energía en toda oscilación, y la instalación de estos circuitos es suficiente para evitar las oscilaciones de amplitud creciente, debido a que la energía que estos circuitos absorben, por lo general, supera grandemente a la del ciclo estudiado (fig. 23).

En la práctica, si  $\frac{R}{X_q}$  (fórmula 76) es lo suficientemente pequeño, el amortiguamiento natural de la máquina basta para que las oscilaciones crecientes no tengan lugar ni en vacío.



Puede citarse un caso práctico ocurrido en una central de la provincia de Gerona, cuya máquina es de 1.250 KVA. a 5.500 voltios, conectada a la red con una línea de unos cinco kilómetros. Después de varios años de funcionamiento normal, se presentó el caso de no poder sincronizar la máquina, pues en el momento de conectarla en paralelo, a pesar de tener el máximo cuidado, perdía rápidamente el sincronismo y tenía que desconectarse. Estudiado el caso, se pensó que la causa era la formación de oscilaciones

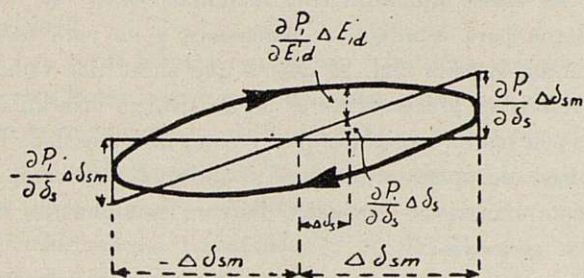


Fig. 24.

pendulares de amplitud creciente; como antes estas oscilaciones no tenían lugar, debía buscarse la causa en un aumento de resistencia óhmica del circuito, y, efectivamente, se observó que en la reparación de unas averías se habían cambiado los conductores de cobre, en unos 300 metros de la línea por otros de hierro, calculando que con este cambio la carga crítica fijada por la fórmula 76 se había aproximadamente duplicado. Esto demostró la causa, se volvió a cambiar los conductores de la línea y el fenómeno no se ha repetido.

#### h) LA SINCRONIZACIÓN ESPONTÁNEA.

En el apartado (B-a) se ha demostrado que la potencia eléctrica de una máquina puede descomponerse en la potencia llamada indiferente y tantas potencias de sincronización como máquinas trabajan en paralelo con ella, las cuales dependen del desplazamiento angular entre las dos máquinas que se consideren. Al presentarse una perturbación, generalmente debida a un cortocircuito, todas las máquinas reciben un choque más o menos grande, por experimentar una variación brusca de las potencias de sincronización; esto determina un desequilibrio más o menos acentua-

do entre los pares mecánico y eléctrico de cada máquina, que da lugar al avance de unas y retraso de otras, variando así las posiciones angulares relativas de los rotores de las máquinas, y empieza, por lo tanto, una primera semioscilación pendular.

En el momento de eliminarse el cortocircuito, las potencias de sincronización experimentan otro salto brusco, que, por lo general, ayuda a que las máquinas encuentren el nuevo estado de equilibrio.

En general, si el sincronismo no se pierde en la primera semioscilación, se formarán una serie de oscilaciones amortiguadas, hasta llegar nuevamente al equilibrio. Durante estas oscilaciones, las potencias de sincronización que circularán entre las máquinas sufrirán fuertes variaciones pendulares sincrónicamente con las oscilaciones.

Cuando se produce el desenganche eléctrico se está francamente en una pérdida de sincronismo, produciéndose un deslizamiento en las revoluciones de las máquinas y se entra en la llamada marcha asincrónica.

En esta marcha la máquina se comporta de manera similar a una de inducción, en cuyo funcionamiento juegan papel muy importante los circuitos amortiguadores, la potencia de los cuales contribuye eficazmente a reducir el deslizamiento de la máquina.

Al entrar en función los mecanismos de regulación de velocidad de las máquinas, éstos contribuyen eficazmente a disminuir el deslizamiento.

En la marcha asincrónica, cuando el deslizamiento no es demasiado grande y cuando las potencias de sincronización son suficientes, puede tener lugar la llamada sincronización espontánea, produciéndose el enganche eléctrico de las máquinas, seguido de algunas oscilaciones pendulares amortiguadas, después de las cuales queda restablecido de nuevo el equilibrio de la marcha en paralelo.

Las corrientes de sincronización actúan sobre las protecciones de manera intempestiva, pues debido a la combinación de estas corrientes con la tensión, las protecciones direccionales pierden el carácter de tales y las de impedancia se comportan anormalmente; pero los «relés» reciben impulsos periódicos, que si éstos son lo suficientemente espaciados, vuelven a la posición de reposo al final de cada impulso y no provocan ninguna desconexión; pero si éstos son relativamente poco espaciados, los «relés» no tienen tiempo de



volver al reposo y llegan a cerrar sus contactos, provocando la desconexión de circuitos, que puede ser intempestiva o no.

Cuando la pérdida de sincronismo tiene lugar entre las máquinas de una misma central, las corrientes de sincronización pueden llegar a valores que no permitan la marcha asincrónica. En cambio, cuando tiene lugar entre centrales interconectadas por sistemas de transmisión, como las impedancias de sincronización son muchas más elevadas, es posible llegar a permitir la marcha asincrónica por un espacio de tiempo que puede ser suficiente para que tenga lugar la sincronización espontánea.

Las elevadas potencias de sincronización favorecen la sincronización espontánea, pero acortan el lapso de tiempo en que se puede tolerar la marcha asincrónica sin peligro. No obstante, los circuitos amortiguadores contribuyen grandemente a la sincronización espontánea y alejan el peligro de las corrientes de sincronización durante la marcha asincrónica <sup>29</sup>.

En el Apéndice IX se detallan unas pruebas efectuadas en el Laboratorio Eléctrico de la Escuela de Peritos Industriales, de Barcelona, con dos alternadores de 25 y 10 KVA., en las que después de perder el sincronismo se logra la sincronización espontánea en varios casos.

### C.—REDES EN MINIATURA

#### a) VISIÓN DE CÓMO PUEDE SER UNA RED EN MINIATURA.

Después de la exposición del método de las etapas sucesivas, puede comprenderse la exactitud de este método, así como también su laboriosidad y, por lo tanto, la necesidad de utilizar una red en miniatura para obtener resultados lo suficientemente exactos.

En el Instituto Tecnológico de Massachussets existe una red en miniatura <sup>28</sup> formada con aparatos estáticos, en la que las diferentes impedancias que representan las máquinas, transformadores, líneas y cargas pueden acoplarse de cualquier manera, pudiendo estudiar la mayoría de redes que pueden presentarse. Esta flexibilidad es adecuada por tratarse de una red miniatura instalada en un instituto, en la que debe poderse estudiar distintos sistemas.

En cambio, en una empresa determinada en la que

sólo interesa estudiar sus propias redes, se simplificarían mucho las operaciones al adoptar una red en miniatura de conexiones más rígidas, con tal que puedan representarse todos los estados de la red y tener en cuenta las futuras ampliaciones. En tal caso, pueden montarse todas las impedancias y demás elementos detrás del cuadro y en la parte de delante todos los mandos y clavijas, pintando el esquema de la red; de este modo, es fácil y cómodo representar cualquier estado de conexiones sin exponerse a errores.

Las redes miniatura con máquinas reales <sup>2</sup> se instalaron para estudiar los fenómenos y no para estudiar un sistema real. El caso a que ahora nos vamos a referir es precisamente el de un sistema determinado y la red en miniatura que creemos más adecuada es a base de aparatos estáticos y aplicando las componentes simétricas (Apéndice I), con las siguientes líneas generales:

1.º Puede consistir en tres cuadros monofásicos que representen las tres redes componentes: directa, inversa y homopolar.

2.º Las redes inversa y homopolar no necesitarían tensión de alimentación; en cambio, la red directa se alimentará con tensión alterna.

3.º Cada central puede estar representada por una sola máquina equivalente.

4.º Las máquinas se representarán por una tensión constante y una reactancia.

5.º La tensión a que se refiere el punto anterior debe ser independiente de la carga, lo cual puede conseguirse procurando que los transformadores alimentadores sean de suficiente potencia.

6.º Debe poder regularse a voluntad la magnitud y fase de esta tensión.

7.º Como los estudios sobre estabilidad exigen poder variar y medir un gran número de veces los desplazamientos angulares entre las tensiones interiores de las máquinas, lo más práctico es representar las máquinas mediante un «Transformador decalador» que puede ser un transformador de campo giratorio parecido a un motor de inducción de un par de polos, cuyo estator se alimente de corriente trifásica y cuyo rotor esté devanado como monofásico. Mediante un tornillo sin fin se puede dar distintas posiciones angulares al rotor representando distintos decalajes de la tensión interior de la máquina.

Para variar la magnitud de esta tensión, puede dis-



ponerse el mencionado rotor con un número de tomas suficiente.

8.º Las impedancias de las líneas pueden representarse mediante bobinas de reactancia y resistencias de un valor fijo de acuerdo con las características de la línea.

A fin de que las bobinas de reactancia sean más económicas, es muy probable deban construirse con núcleo de hierro formando un circuito abierto para que las líneas de fuerza se cierren por un espacio de aire y disminuir así suficientemente los efectos de saturación.

Las resistencias serán de un valor algo inferior al de las líneas que representan, pues habrá que descontar la resistencia propia de las bobinas de reactancia.

9.º Cada transformador y auto-transformador, puede representarse por una reactancia de valor fijo, y los transformadores trabajando en paralelo, en una misma central o estación, pueden representarse por una sola reactancia de valor regulable de acuerdo con los transformadores que estén en servicio.

Aunque las bobinas de reactancia siempre tendrán algo de resistencia óhmica, debe tenerse presente que los transformadores también la tienen. La cuestión se reduce a que el factor de potencia de estas bobinas sea del mismo orden que el de un transformador.

10. Las reactancias interiores de las máquinas se representarán por bobinas de reactancia regulables, para poderse adaptar al valor que corresponda, según la clase de reactancia que se considere y el número de máquinas en servicio de la central que se represente.

Respecto a la resistencia óhmica que forzosamente tendrán estas bobinas, se presenta el mismo problema que en el punto anterior, pero probablemente con mayor dificultad, conduciéndonos a bobinas de mayores dimensiones.

11. Las capacidades electrostáticas de las líneas se representarán mediante condensadores estáticos de valores apropiados.

12. Los condensadores y motores sincrónicos pueden representarse como los generadores.

13. La carga de los motores de inducción se representará considerando la máquina sincrónica ficticia que la sustituye (apartado B-f).

14. La carga de aparatos estáticos puede representarse mediante resistencias y reactancias.

Estas son las líneas generales de una red en miniatura. Para llevar a cabo su construcción desde luego que faltan por resolver una serie de cuestiones de detalle, como aparatos de medida, simplificaciones encaminadas a reducir el coste total, etc.

#### b) APLICACIONES.

Una red en miniatura de esta naturaleza puede aplicarse, en general, para el estudio de todos los fenómenos de frecuencia normal, en los que son datos las características y condiciones de carga del sistema; en cambio, no sirve para el estudio de los efectos de saturación, armónicos, fenómenos transitorios, alta frecuencia, sobretensiones debidas a descargas atmosféricas o a la desconexión de aparatos, efectos corona, etcétera. Se puede considerar que una red miniatura así concebida es un instrumento mecánico de cálculo que nos permite determinar cómodamente y con gran economía de tiempo la distribución de tensiones, corrientes y potencias activas y reactivas en todos los estados del sistema que deben considerarse en cualquier estudio.

Las principales aplicaciones a que se pueden destinar pueden detallarse en los siguientes puntos:

1.º Estudio de la regulación de voltaje, distribución de las cargas y del factor de potencia, así como la manera de mejorar este factor instalando condensadores sincrónicos u otros aparatos adecuados.

2.º Estudio de futuras ampliaciones o modificaciones del sistema, desde el punto de vista de regulación de voltaje y repartición de las cargas activas y reactivas.

Sin conocer las características de los futuros circuitos o aparatos, éstos no pueden representarse en la red miniatura; pero una vez estas características se hayan fijado, por medio de cálculos, que pueden ser grandemente simplificados empleando la red miniatura, puede estudiarse en dicha red el comportamiento futuro del sistema con las ampliaciones o modificaciones que se prevén.

3.º Cálculo de toda clase de cortocircuitos trifásicos, bifásicos o monofásicos y la distribución de la corriente y tensión en todo el sistema. Este conocimiento es de interés para determinar los ajustes de las distintas protecciones del sistema.

Para la determinación de la capacidad de ruptura



de los disyuntores es necesario conocer los valores de los cortocircuitos; pero para esto, generalmente, basta saber el valor de los cortocircuitos trifásicos equilibrados, cuya determinación puede lograrse con suficiente aproximación, para la mayoría de los casos, mediante una sencilla red en miniatura a base de corriente continua. Sin embargo, esta otra red no serviría para ningún otro fin, ni para ninguna otra clase de cortocircuitos.

4.º Estudio de la estabilidad del sistema y determinación de límites de potencia.

Debemos tener en cuenta, que la red miniatura está formada por elementos estáticos y que, por lo tanto, no podrá tener en cuenta el efecto de inercia de las máquinas. Esto nos indica que en el estudio de la estabilidad la red miniatura no es más que un poderoso utensilio de cálculo para el método de las etapas sucesivas.

#### c) MANERA DE OPERAR PARA EL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD.

En la aplicación del método de las etapas sucesivas por su laboriosidad puede considerarse como indispensable el empleo de una red miniatura. El camino para la aplicación de este método ya se ha indicado en el apartado (B-e); refiriéndonos ahora a las operaciones que deberán efectuarse con la red miniatura, exponemos lo siguiente:

1.º Se preparan las tres redes componentes directa, inversa y homopolar con las conexiones correspondientes al caso que se desea estudiar (Apéndice I).

2.º A los reactores que representan las máquinas en la red directa se les da el valor correspondiente a la reactancia en cuadratura de las máquinas.

3.º Se colocan los transformadores decaladores en las posiciones correspondientes para que cada máquina o central tenga la carga que se desee.

Esta operación sólo corresponde a la red directa, y la carga de cada máquina o central puede medirse con watímetros adecuados que, mediante clavijas, pueden conectarse a una u otra máquina.

Téngase en cuenta que, para que la tensión que da un transformador decalador sea precisamente la que nos da la potencia eléctrica, es necesario tomar el valor de la reactancia en cuadratura (Apéndice III).

4.º Mediante aparatos de medida apropiados se puede medir la componente en fase  $I_d$  de la corriente

de cada central, que es precisamente la componente dewaterada con la tensión que da el decalador.

5.º Después se produce el cortocircuito sobre la red miniatura, para lo cual se acoplan las tres redes componentes directa, inversa y homopolar en la forma adecuada según la clase de cortocircuito (apartado B-c).

Entonces la componente en fase  $I_d$  de la corriente de las máquinas experimenta una variación que no representa la que experimenta en la red real, pues en ésta permanece constante la tensión interior transitoria  $E_d$  y no la  $E_Q$ ; pero la variación de  $E_Q$  puede determinarse mediante la fórmula (52) aplicada a la primera etapa y corregir así la magnitud de la tensión que da cada decalador. Una vez esto efectuado, quedará corregida la variación  $I_d$  y si se cree necesario puede efectuarse otra corrección de  $E_Q$  y así sucesivamente se encontrarán  $E_Q$  e  $I_d$  mediante aproximaciones sucesivas. Por lo general, bastará una sola corrección.

6.º Una vez efectuado lo del punto anterior, podrá medirse la nueva carga que toma cada central e ir aplicando el método de las etapas sucesivas tal como se ha expuesto.

7.º Para pasar de una etapa a la siguiente se dará a cada máquina, mediante el decalador, el incremento de ángulo correspondiente y el valor  $\Delta I_{dn}$  se hallará por aproximaciones sucesivas, tal como se ha dicho en el punto 5.º

8.º Durante cada etapa se determinará la potencia eléctrica de cada máquina, mediante los watímetros a que se refiere el punto 3.º, indicando la fórmula (58) la magnitud de la tensión que, a este efecto, deben suministrar los transformadores decaladores.

9.º Cuando por haberse considerado suficientes etapas se ha llegado al momento de la eliminación del defecto, se desacopla la interconexión entre las tres redes componentes y sólo se tiene en cuenta la red directa, desconectando aquellos circuitos que en la red real eliminan el defecto. Entonces, puede determinarse la variación de  $I_d$  en la misma forma que en el punto 5.º y medir la nueva carga como en el punto 6.º

10. Se continúan considerando sucesivamente nuevas etapas hasta terminar la primera oscilación de la máquina en la que se estudia su estabilidad o ver que esta máquina pierde el sincronismo.

Estas son, en líneas generales, las operaciones a realizar con la red en miniatura.



d) DETERMINACIÓN APROXIMADA DE LAS CONSTANTES DE DECRECIMIENTO

Para la determinación de la constante de decrecimiento de una máquina se empleará la fórmula (56), en la que la constante de proporcionalidad entre  $T_d$  y  $T_{d0}$  vale:

$$K_d = \frac{T_d}{T_{d0}} = \frac{R_{ii}^2 + X'_{iidq} X_{iiqq}}{R_{ii}^2 + X_{iidq} X_{iiqq}} \quad (77)$$

que puede transformarse en:

$$K_d = \frac{\left( \frac{I^2 R_{ii}}{I^2 X_{iiqq}} \right)^2 + \frac{I^2 X'_{iidq}}{I^2 X_{iiqq}}}{\left( \frac{I^2 R_{ii}}{I^2 X_{iiqq}} \right)^2 + \frac{I^2 X_{iidq}}{I^2 X_{iiqq}}} \quad (78)$$

Teniendo en cuenta que en esta fórmula los valores de  $X$  son las reactancias indiferentes de las máquinas cuya constante de decrecimiento se busca y que  $I$  puede ser cualquier corriente, dicha fórmula nos dice que  $K_d$  se hallará efectuando las operaciones siguientes:

1.º Se toman las reactancias en cuadratura de todas las máquinas y se anula la tensión interior de todas ellas, excepto la que se busca su constante; para lo cual se desconectarán los transformadores decaladores correspondientes y se pondrán en cortocircuito los puntos que alimentaban.

2.º Se aplicará a la máquina cuya constante se busca una tensión cualquiera, escogiendo la que más nos convenga para que la corriente  $I$  de circulación sea de un valor adecuado.

La potencia activa que circulará por esta máquina será el valor de  $I^2 R_{ii}$  y la potencia reactiva será el de  $I^2 X_{iiqq}$ .

3.º Se toma para la máquina que se considere la reactancia transitoria en fase, conservando la reactancia en cuadratura para las demás y se varía la magnitud de la tensión aplicada a esta máquina hasta que circule por ella la misma corriente  $I$  en amperios que en la operación anterior. La potencia reactiva que circulará ahora será el valor de  $I^2 X'_{iidq}$ .

4.º El valor de  $I^2 X_{iidq}$  se hallará de manera análoga a la operación anterior, tomando para la máquina que se considere la reactancia sincrónica en fase.

Una vez efectuadas estas operaciones se tendrán los valores suficientes para aplicar las fórmulas (78 y 77) y obtener, por lo tanto, el valor  $T_d$  ya que  $T_{d0}$  es un

valor característico de la máquina independientemente de su estado de funcionamiento.

La constante de decrecimiento  $T_d$  puede determinarse también de otra manera menos aproximada, pero más cómoda, aplicando la siguiente fórmula obtenida en el Apéndice VI:

$$T_d = \frac{X'_{iidq}}{X_{iidq}} \frac{x_d}{x'_d} T'_d \quad (79)$$

en la que el valor  $T'_d$  puede determinarse una vez para siempre en cada máquina, y las dos razones entre las impedancias puede determinarse por medio de las correspondientes corrientes de cortocircuito, ya que, con cierta aproximación, estas corrientes son inversamente proporcionales a aquellas reactancias. Así, substituyendo las razones entre reactancias por las razones entre estas corrientes, la (79) se convierte en:

$$T_d = \frac{I_{xidq}}{I'_{xidq}} \frac{I'_{xd}}{I_{xd}} T'_d \quad (80)$$

Las corrientes  $I'_{xd}$  e  $I_{xd}$  son, respectivamente, las corrientes transitorias y en régimen permanente para un cortocircuito trifásico en bornes de la máquina, cuyos valores sólo dependen de las características de la misma y pueden determinarse una vez para siempre. Si se hace, pues,

$$\frac{I'_{xd}}{I_{xd}} T'_d = T_K \quad (81)$$

se tiene:

$$T_d = \frac{I_{xidq}}{I'_{xidq}} T_K \quad (82)$$

en la que  $T_K$  es una constante de la máquina en cuestión,  $I_{xidq}$  e  $I'_{xidq}$  son, respectivamente, las corrientes permanente y transitoria de cortocircuito, anulando las tensiones interiores de todas las otras máquinas y tomando las reactancias en cuadratura de éstas, las cuales pueden determinarse con la red en miniatura.

## D.—EJEMPLO DE CÁLCULO DEL LÍMITE DE POTENCIA

### a) DATOS DEL EJEMPLO

Se trata de determinar el límite de potencia de la central Z, que forma parte del sistema eléctrico hipotético, representado en la figura 25, cuyas características principales se supone son las siguientes:

1.º Las centrales A, B, C, D, E, F, G y H están



conectadas a 110.000 voltios y las centrales I y J lo están a 80.000, con las potencias y reactancias indicadas en la figura 25. Los valores de estas reactancias involucran máquinas y transformadores.

2.º La estación transformadora K (fig. 25) tiene por objeto establecer el acoplamiento entre las líneas 110 y 80 kilovoltios, mediante un autotransformador de 50.000 kilovoltios amperios con el 2,76 % de reactancia.

3.º En las estaciones transformadoras receptoras L, M, N, O, P, Q, R, S, T y U (fig. 25) hay condensadores síncronos para mejorar el factor de potencia y regular el voltaje. La potencia en conjunto de estos condensadores síncronos se supone de 41.500 kVA. con el 35 % de reactancia transitoria.

4.º Las subestaciones de transformación se supone tienen en conjunto 200.000 kVA. de transformadores con 5 % de reactancia y 49.000 kVA. de condensadores síncronos con el 35 % de reactancia transitoria.

5.º Se supone también que hay subcentrales de transformación de corriente alterna en continua, con grupos convertidores, cuyos motores síncronos tienen en conjunto 57.940 kVA. con 30 % de reactancia transitoria.

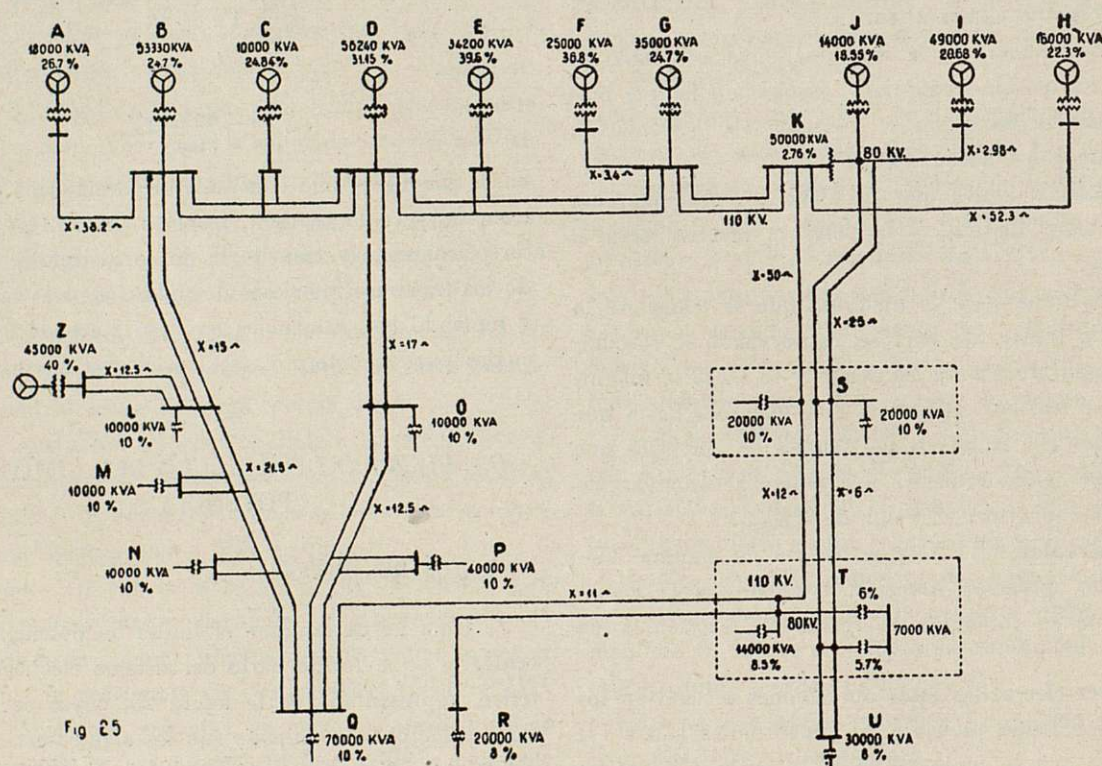
6.º La potencia global de todos los motores de inducción de los abonados se supone es de 230.000 kVA. Según se indican en el apartado (B-f) debe tomarse la reactancia sincrónica de estos motores, la que se considerará de 300 %.

7.º A fin de tener en cuenta la reactancia de los transformadores que alimentan las redes de baja tensión, se considerará que los 230.000 kVA. de motores de inducción se alimentan de otra potencia igual de transformadores con el 3 % de reactancia.

#### b) MÉTODO QUE SE HA DE SEGUIR Y SU APROXIMACIÓN

El método de las etapas sucesivas es adecuado cuando se dispone de una red en miniatura. En el ejemplo que nos ocupa emplearemos el método de las áreas, admitiendo las hipótesis simplificadoras en que éste descansa.

El método de las áreas podría aplicarse teniendo en cuenta las resistencias óhmicas; pero como esto nos complicaría los cálculos, tendremos en cuenta solamente las reactancias, tal como se ha expuesto en la parte B.





El límite de potencia que así obtendremos será con aproximación muy relativa, pero el error será por defecto, ya que su mayor parte provendrá de suponer constantes las excitaciones de las máquinas.

#### c) REDUCCIÓN AL CASO IDEAL DE DOS MÁQUINAS

El método de las áreas sólo es aplicable al caso de dos máquinas; en cambio, el caso que ahora nos ocupa es de varias centrales interconectadas por una red bastante complicada (fig. 25), por lo que es conveniente una previa simplificación. Para lograr esto, nos basaremos en los siguientes puntos y aproximaciones:

1.º La máquina 1 representará la central Z y la 2 todas las demás centrales, condensadores síncronos, motores síncronos y motores de inducción.

2.º La potencia aparente de la central Z la tomaremos de 45.000 kVA. con una reactancia transitoria de la máquina del 30 % más el 10 % para los transformadores, será un total de 40 %.

Se prefiere suponer para estas reactancias valores más bien excesivos, ya que así el error del límite de potencia será por defecto.

3.º Despreciamos las impedancias de las líneas 110 kilovoltios entre las centrales B, C, D, E, G y K, considerando como si estas líneas fuesen las barras de una central con lo que quedan así reducidas todas las centrales 110 kV., excepto la Z, a una sola máquina ficticia. Según el cálculo que se detalla a continuación, esta máquina ficticia resulta ser de una potencia aparente de 247.770 kVA. con el 29,4 % de reactancia transitoria.

**Determinación característica de la máquina ficticia que representa las centrales de 110 KV.**

	KVA	React en %		Base en KVA para el 30 % de react.
Central A.....	18.000	26,7		
Línea AB.....	»	5,7	32,4	16.770
Central B.....	53.330		24,7	64.750
Central C.....	10.000		24,84	12.080
Central D.....	56.240		31,15	54.100
Central E.....	34.200		39,6	25.900
Central F.....	25.000	36,8		
Línea FG.....	»	0,7	37,5	20.000
Central G.....	35.000		24,7	42.500
Central H.....	16.000	22,3		
Línea HK.....	»	6,9	29,2	16.450
	247.770			252.550

Para 247.770 kVA. de base:

$$X = 30 \cdot \frac{247.770}{252.550} = 29,4 \%$$

4.º Asimismo, substituiremos todas las centrales 80 kilovoltios por una máquina ficticia en barras de 80 kV. de la estación transformadora K. Según el cálculo que se expresa a continuación, esta máquina ficticia resulta ser de una potencia aparente de 63.000 kVA, con el 21,8 % de reactancia transitoria.

**Determinación característica de la máquina ficticia que representa las centrales de 80 KV.**

	KVA	React en %		Base en KVA para el 30 % de react.
Central I.....	49.000	20,68		
Línea IK.....	»	2,29	22,97	64.000
Central J.....	14.000		18,55	22.650
	63.000			86.650

Para 63.000 kVA. de base:

$$X = 30 \cdot \frac{63.000}{86.650} = 21,8 \%$$

5.º La carga de todas las estaciones transformadoras y sus motores síncronos, la supondremos localizada en la estación Q (fig. 25).

6.º Los transformadores de todas las estaciones transformadoras representan una potencia aparente total de 254.000 kVA. con una reactancia de 9,43 %, calculada como sigue:

Estación transform.	KVA	React. en %	Base en KVA para el 10 % de react.
L	10.000	10	10.000
M	10.000	10	10.000
N	10.000	10	10.000
O	10.000	10	10.000
P	40.000	10	40.000
Q	70.000	10	70.000
R	20.000	8	25.000
S	40.000	10	40.000
T	14.000	8,5	16.500
U	30.000	8	37.500
	254.000		269.000

Para 254.000 kVA. de base:

$$X = 10 \cdot \frac{254.000}{269.000} = 9,43 \%$$

Así, teniendo en cuenta los datos del ejemplo y las simplificaciones expuestas, la red de la figura 25 que-



da reducida al esquema de la figura 26 y representando todas las reactancias en %, tomando como base 45.000 kVA., tendremos el esquema de figura 27.

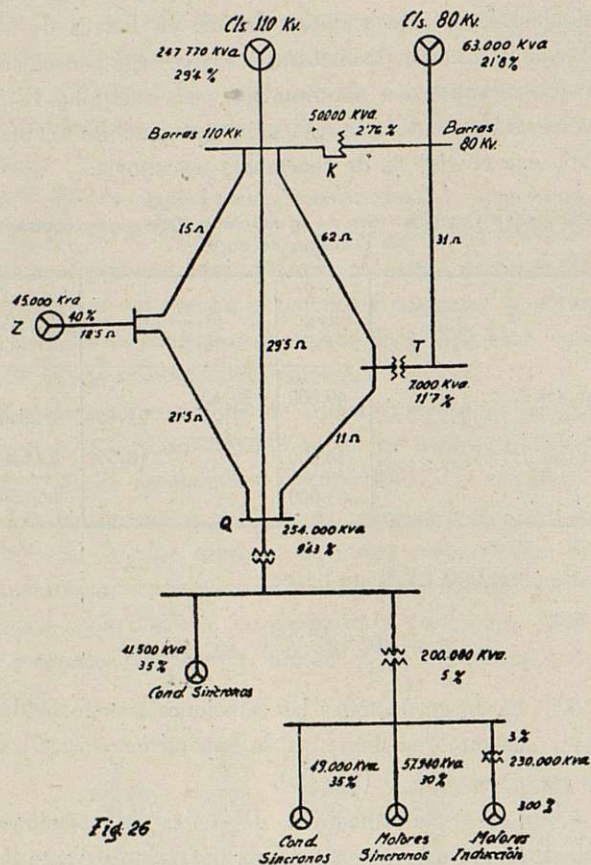


Fig. 26

Si se aplica ahora el método de transformación de triángulos, en estrellas, simplificaremos esta red (figura 27). Así, convirtiendo los triángulos A D E y A B C, se pasa al esquema de la figura 28, en la que se tiene:

$$\text{Reactancia MD} = \frac{8 \times 5,6}{5,6 + 11 + 8} = \frac{8 \times 5,6}{24,6} = 1,8 \%$$

$$\text{Reactancia MA} = \frac{5,6 \times 11}{24,6} = 2,5 \%$$

$$\text{Reactancia ME} = \frac{11 \times 8}{24,6} = 3,6 \%$$

$$\text{Reactancia NA} = \frac{23 \times 2,5}{2,5 + 96,8 + 23} = \frac{23 \times 2,5}{122,3} = 0,47 \%$$

$$\text{Reactancia NB} = \frac{2,5 \times 96,8}{122,3} = 2 \%$$

$$\text{Reactancia NC} = \frac{96,8 \times 23}{122,3} = 18,2 \%$$

Para la mejor comprensión de estos esquemas, debemos aclarar que los comprendidos entre las figu-

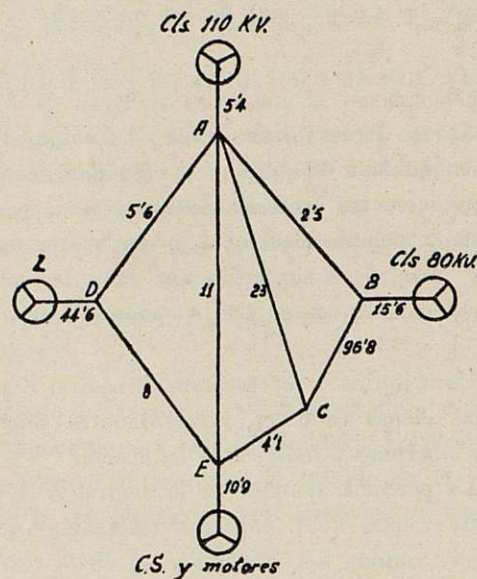


Fig. 27

ras 28 y 34, ambos inclusive, las líneas de trazo interrumpido no representan ninguna línea de conexión entre nudos, sino que sólo sirven para indicar las co-

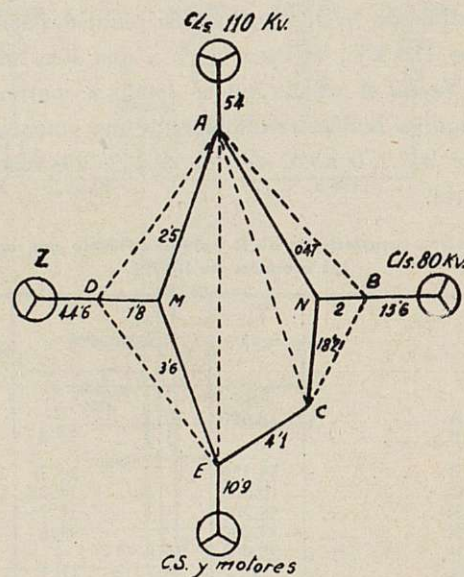


Fig. 28

nexiones representadas en la figura anterior, que desaparecen en virtud de la simplificación.



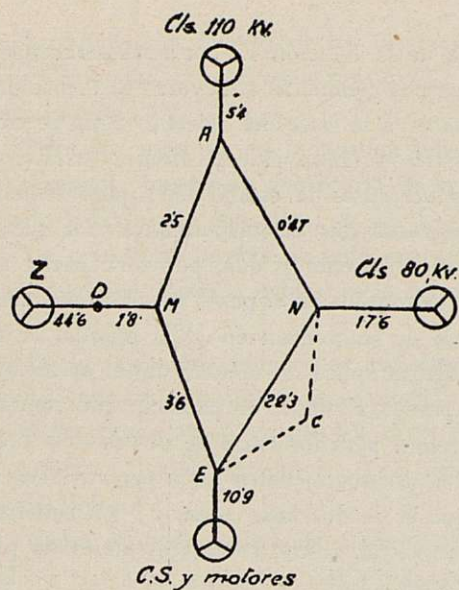


Fig. 29

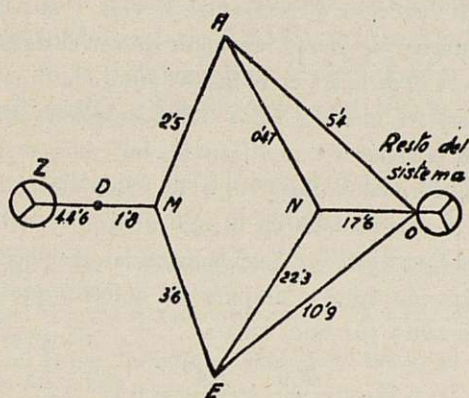


Fig. 30

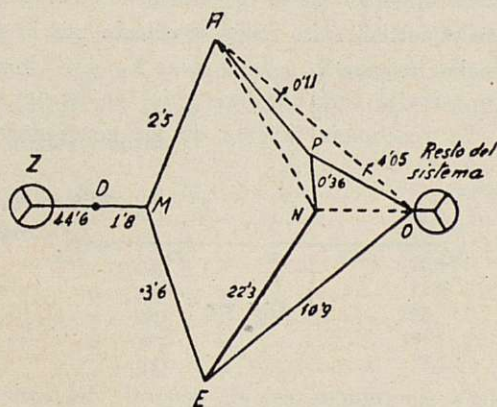


Fig. 31

Al desaparecer el nudo C (fig. 28), tendremos el esquema de la figura 29 y para llevar la simplificación al caso de dos máquinas, precisa substituir las tres máqui-

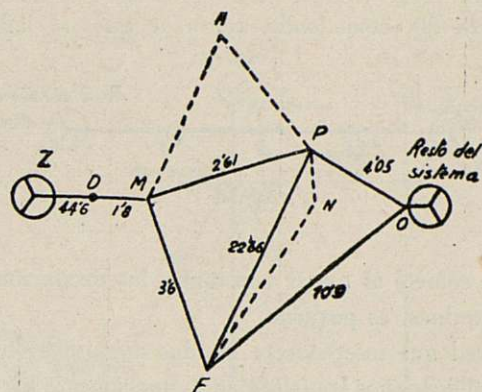


Fig. 32

nas conectadas a los nudos A, N y E (fig. 29) por otra equivalente.

Para esto deberían fijarse las cargas de estas máqui-

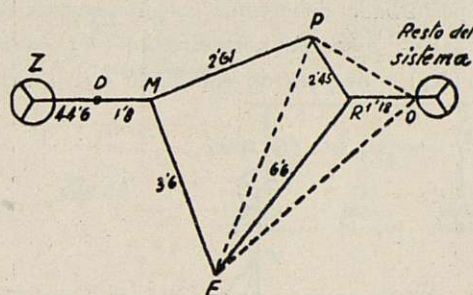


Fig. 33

nas, determinar sus tensiones interiores y aplicar el método que se expone en el Apéndice II. Pero, ante la complicación que esto representa y teniendo en cuenta

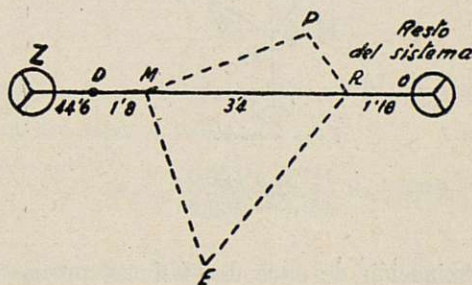
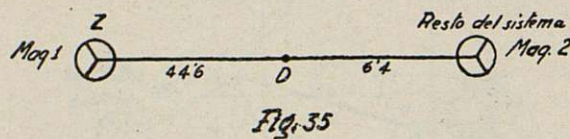


Fig. 34



que estamos desarrollando unos cálculos de aproximación relativa, supondremos que las tres máquinas en cuestión tienen la misma tensión interior y así el esquema de la figura 29 quedará substituído por el de la figura 30, cometiendo un error que, al lado del

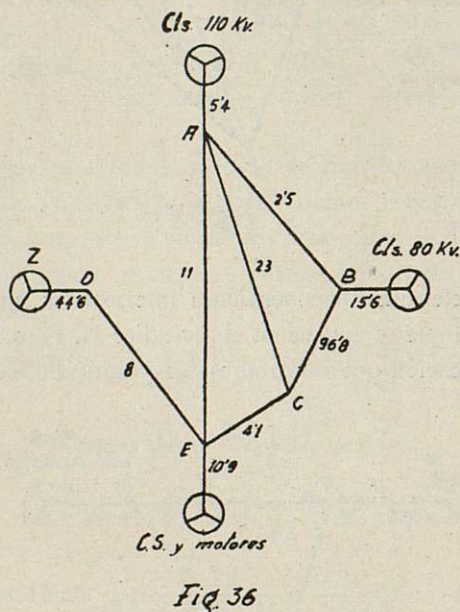


que se comete al tomar constantes las excitaciones de las máquinas, es pequeño.

La red que interconecta las dos máquinas (fig. 30) la simplificaremos transformando nuevamente los triángulos en estrellas. Así, pasaremos por los esquemas de las figuras 31, 32, 33 y 34 hasta llegar al caso ideal de dos máquinas (fig. 35).

#### d) REACTANCIAS DE SINCRONIZACIÓN

Para la determinación del límite de potencia en régimen perturbado deberemos considerar tres reactancias, a saber: antes del cortocircuito ( $X_A$ ), durante el mismo ( $X_B$ ) y después de eliminado éste ( $X_C$ ). Para



la determinación de estas dos últimas, precisa elegir lugar del defecto y clase del mismo.

Como lugar escogeremos las dos líneas BL (fig. 25)

en salida de la estación L, por considerar que es el punto que nos conducirá a mayores perturbaciones.

En cuanto a la clase del defecto, según lo expuesto en el apartado (B-c), el cortocircuito trifásico es el que más perjudica la estabilidad; pero teniendo en cuenta que esta clase de cortocircuitos es la que se presenta más raramente y que, por otra parte, uno de estos cortocircuitos en el punto escogido nos daría una reactancia de sincronización ( $X_B$ ) infinita, la que no nos permitiría aplicar el método de las áreas tal como se ha expuesto, el límite de potencia que vamos a determinar será para los casos de dos fases a tierra. El caso de cortocircuito entre fases perjudica en menor grado que el de dos fases a tierra; sin embargo, determinaremos al mismo tiempo el límite de potencia para este otro caso.

La eliminación del defecto consistirá en la desconexión de las dos líneas BL (fig. 25), y, por lo tanto, se pierde la conexión directa entre B y L, y el esquema representativo de la red, en lugar de ser el de la figura 27, será el de la 36, en el que se pierde la unión AD.

Aplicando el método de la transformación de triángulos en estrellas y simplificando, tal como se ha hecho anteriormente, llegaremos al caso ideal de dos máquinas representado en la figura 37.

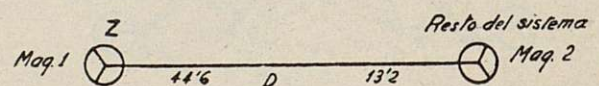
De las figuras 35 y 37 se deducen las reactancias de sincronización antes y después del defecto, que expresadas en tanto por uno valen:

$$X_A = \frac{44,6}{100} + \frac{6,4}{100} = 0,51 \quad (83)$$

$$X_C = \frac{44,6}{100} + \frac{13,2}{100} = 0,578 \quad (84)$$

La determinación de la reactancia de sincronización durante el cortocircuito exige el cálculo previo de las reactancias inversa  $X_i$  y homopolar  $X_h$  en el punto del defecto, para lo cual nos basaremos en lo siguiente:

1.º La reactancia inversa de los generadores hi-



dráulicos sincrónicos es, en general, del orden del 130 % de su reactancia transitoria en fase. Este es el valor que tomaremos para todas las centrales.



2.º La reactancia inversa de los condensadores y motores síncronos la tomaremos del 25 % y 20 %, respectivamente.

3.º Para los motores de inducción debe tomarse como reactancia inversa la transitoria de la máquina (apartado B-f), la que consideramos del 15 %.

4.º La reactancia inversa de todo aparato estático (transformadores, líneas o cables) es la misma que la normal.

5.º En la reactancia homopolar del sistema en el punto del defecto sólo intervienen aquellos transformadores que tienen el neutro 110 kV. u 80 kV. conectado a tierra y las líneas que conectan éstos con el punto del defecto.

6.º Como el único neutro del sistema 80 kV. conectado a tierra se supone es del autotransformador 110/80 kilovoltios en K, dicho sistema 80 kV. no figurará en la red homopolar.

Como se supone que este autotransformador tiene un devanado terciario a 6 kV. en triángulo de 10.000 kVA., en la red homopolar deberá figurar como un transformador triángulo/estrella 6/110 kV., de 10.000 kVA.

7.º El neutro del sistema 110 kV. se supone conectado directamente a tierra en:

Central A por 1 transformador de 9.000 kVA. con 9,8 % de reactancia.

Central C por 1 transformador de 10.000 kVA. con 6,9 % de reactancia.

Central D por 2 transformadores de 14.100 kVA. con 9,17 % de reactancia.

Central E por 2 transformadores de 17.100 kVA. con 12,1 % de reactancia.

Central F por 1 transformador de 27.000 kVA. con 10,8 % de reactancia.

Central K por 1 transformador de 10.000 kVA. con 7,28 % de reactancia

8.º La reactancia homopolar de las líneas podría tomarse igual a unas 4 veces la normal; sin embargo, se considerará como un dato del ejemplo tomando los siguientes valores:

Línea	AB (fig. 25)	.....	120 ohmios
•	FG	•	12,8 •
Líneas	BL	•	52 •
•	LZ	•	39,2 •
•	LQ	•	73,5 •
•	DQ	•	102 •
•	KT	•	204 •
•	TQ	•	17,6 •

Según esto y tomando en consideración las aproximaciones admitidas en el apartado anterior, las redes

inversa y homopolar vienen representadas por los esquemas de las figuras 38 y 39, respectivamente. Simplificando estos esquemas, por los mismos procedimientos empleados en dicho apartado, se encuentra como

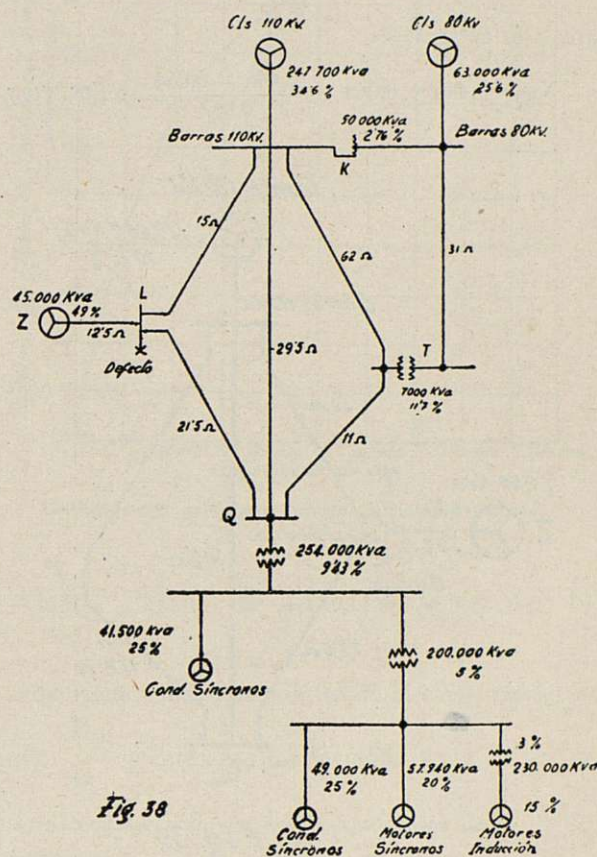


Fig. 38

reactancia inversa y homopolar en el punto del defecto 5,2 %, y 13,4 %, respectivamente, tomando como base 45.000 kVA.

Expresando estas reactancias en tanto por uno, tendremos:

$$X_i = 0,052 \quad (85)$$

$$X_h = 0,134 \quad (86)$$

Aplicando las fórmulas (26) y (25) se encuentra:  
Para dos fases a tierra:

$$X_K = \frac{0,052 \times 0,134}{0,052 + 0,134} = 0,0375. \quad (87)$$

Para c/c. entre fases:

$$X_K = 0,052 \quad (88)$$



Para tener la reactancia de sincronización en estos dos casos, bastará aplicar la fórmula (22), resultando:

Para dos fases a tierra:

$$X_B = 0,446 + 0,064 + \frac{0,446 \times 0,064}{0,0375} = 1,27. \quad (89)$$

Para c/c. entre fases:

$$X_B = 0,446 + 0,064 + \frac{0,446 \times 0,064}{0,052} = 1,06. \quad (90)$$

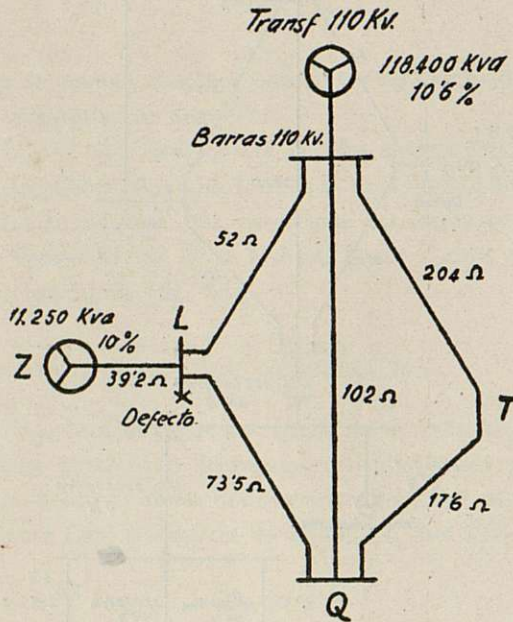


Fig. 39

#### e) POTENCIAS MÁXIMAS DE SINCRONIZACIÓN Y LÍMITES DE POTENCIA

Estas potencias vendrán determinadas por la fórmula (19), que aplicándola a cada reactancia (83), (84), (89) y (90), se tiene:

Antes de presentarse el defecto:

$$P_A = \frac{E_1 E_2}{0,51} \quad (91)$$

$$\text{Durante el defecto.} \begin{cases} 2 \text{ fases a tierra: } P_B = \frac{E_1 E_2}{1,27} & (92) \\ \text{c/c. entre fases: } P_B = \frac{E_1 E_2}{1,06} & (93) \end{cases}$$

Después de la eliminación del defecto:

$$P_C = \frac{E_1 E_2}{0,578} \quad (94)$$

Si por un momento tomamos como unidad la potencia máxima de sincronización  $P_A$ , antes de presentarse el defecto (valor 91) los valores (92) (93) y (94) vendrán medidos por:

$$\text{Antes de presentarse el defecto:} \quad 1 \quad (95)$$

$$\text{Durante el defecto.} \begin{cases} 2 \text{ fases a tierra: } \frac{P_B}{P_A} = 0,401 & (96) \\ \text{c/c. entre fases: } \frac{P_B}{P_A} = 0,481 & (97) \end{cases}$$

Después de la eliminación del defecto:

$$\frac{P_C}{P_A} = 0,882 \quad (98)$$

Reproduciendo aquí el gráfico 2 del apartado B-c para aplicarlo a los valores (96) (97) y (98), se halla

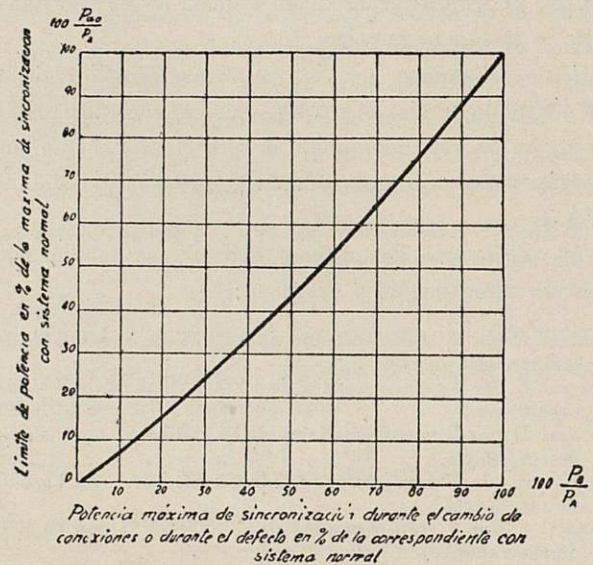


Gráfico 2.—Límite de potencia para poder desconectar un circuito de interconexión o para aguantar permanentemente un defecto

respectivamente (en este gráfico los valores están en tanto por ciento en lugar de tanto por uno):

$$\text{Límite de potencia en esquema normal} \dots 1 \quad (99)$$

$$\text{Límite de potencia para aguantar permanentemente el defecto de dos fases a tierra} \dots 0,33 \quad (100)$$

$$\text{Límite de potencia para aguantar permanentemente el cortocircuito entre fases} \dots 0,41 \quad (101)$$

$$\text{Límite de potencia si la eliminación del defecto pudiera tener lugar en un tiempo nulo} \dots 0,85 \quad (102)$$

Vamos a calcular primeramente los valores de  $E_1$  y  $E_2$  para distintas cargas iniciales, para lo cual su-



pondremos que en el punto D (fig. 35) hay el voltaje unidad. Suponiendo todas las cargas a factor de potencia 0,9 inducción, tendremos:

$$\cos \varphi = 0,9 \quad (103)$$

$$\text{tang. } \varphi = 0,484 \quad (104)$$

$$\text{Carga inicial en Kw.} = Q \quad (105)$$

$$\text{Carga inicial en KVAR} = 0,484 Q \quad (106)$$

$$\dot{E}_1 = 1 + j 0,446 \left( \frac{Q}{45000} - j 0,484 \frac{Q}{45000} \right) \quad (107)$$

$$\dot{E}_2 = 1 + j 0,064 \left( \frac{Q}{45000} - j 0,484 \frac{Q}{45000} \right) \quad (108)$$

Así, por ejemplo, para una carga inicial  $Q$ , de 40.000 kilovatios, se tiene:

$$E_1 = 1,192 + j 0,396 \text{ su módulo será } E_1 = 1,26 \quad (109)$$

$$E_2 = 0,973 - j 0,057 \text{ su módulo será } E_2 = 0,974 \quad (110)$$

Aplicando ahora las fórmulas (19) y (83), encontraremos la potencia máxima de sincronización:

$$P_A = \frac{E_1 E_2}{0,51} = \frac{1,26 \times 0,974}{0,51} = 2,40 \text{ en tanto por uno} \quad (111)$$

En KW. será:

$$P_A \times 45.000 = 108.000 \text{ KW.} \quad (112)$$

La razón entre la carga inicial considerada y la máxima de sincronización será:

$$\frac{40.000}{108.000} = 0,37. \quad (113)$$

Repitiendo esta operación para varios valores de  $Q$ , se obtendría la curva del gráfico 4.

Según este gráfico, los límites de potencia (99), (100), (101) y (102), en Kw., serán:

$$\text{Límite de potencia en esquema normal} \dots\dots\dots 450.000 \text{ KW.} \quad (114)$$

$$\text{Límite de potencia para aguantar permanentemente dos fases a tierra} \dots\dots\dots 35.000 \text{ KW.} \quad (115)$$

$$\text{Límite de potencia para aguantar permanentemente cortocircuito entre dos fases} \dots\dots\dots 48.000 \text{ KW.} \quad (116)$$

Límite de potencia si la eliminación del defecto pudiera tener lugar en un tiempo nulo ..... 170.000 KW. (117)

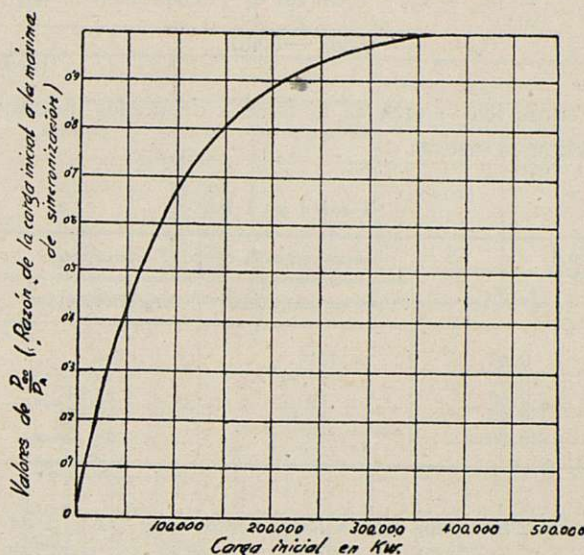


Gráfico 4.—Relación entre cargas iniciales y máximas de sincronización.

#### f) TIEMPO CRÍTICO EN LA ELIMINACIÓN DEL DEFECTO

Supongamos distintos valores de la carga inicial relativa  $\frac{P_{ao}}{P_A}$  y mediante las fórmulas (32) y (33) determinemos los valores correspondientes de  $\delta_{s0}$  y  $\delta_{s2}$ , hallándose:

Tabla I

Carga inicial relativa $\frac{P_{ao}}{P_A}$	$\delta_{s0}$	$\delta_{s1}$	$\delta_{s2} - \delta_{s0}$ en radianes
0,40	23,5°	153°	2,26
0,50	30°	145,5°	2,015
0,60	37°	137°	1,745
0,70	44,5°	127,5°	1,45
0,80	53°	115°	1,08

La fórmula (31) aplicada a los defectos que consideramos será:

Para dos fases a tierra:

$$\cos \delta_{s1} = \frac{\frac{P_{ao}}{P_A} (\delta_{s2} - \delta_{s0}) - 0,481 \cos \delta_{s0} - 0,882 \cos (\pi - \delta_{s2})}{0,882 - 0,401} \quad (118)$$



Para c/c. entre fases:

$$\cos \delta_{s1} = \frac{\frac{P_{ao}}{P_A} (\delta_{s2} - \delta_{s0}) - 0,481 \cos \delta_{s0} - 0,882 \cos (\pi - \delta_{s2})}{0,882 - 0,481} \quad (119)$$

y según los valores de la tabla I detallados anteriormente, se tendrá:

Tabla II

Carga inicial relativa $P_{ao}/P_A$	ANGULO CRÍTICO $\delta_{s1}$	
	Para dos fases a tierra	Para c/c entre fases
0.40	121°	154°
0.50	97,50	110°
0.60	80°	87,50°
0.70	66,50	70,50°
0.80	59°	60°

Determinemos ahora los valores de  $P_{ao}/P_B$  para lo cual basta combinar (91) con (92) y con (93), obteniéndose:

Para dos fases a tierra:

$$\frac{P_A}{P_B} = \frac{1,27}{0,51} = 2,49. \quad (120)$$

Para c/c. entre fases:

$$\frac{P_A}{P_B} = \frac{1,06}{0,51} = 2,08 \quad (121)$$

y al ser:

$$\frac{P_{ao}}{P_B} = \frac{P_{ao}}{P_A} \cdot \frac{P_A}{P_B} \quad (122)$$

es fácil encontrar los resultados siguientes:

Tabla III

Carga inicial relativa $P_{ao}/P_A$	VALORES DE $P_{ao}/P_B$	
	Para dos fases a tierra	Para c/c entre fases
0.40	0,995	0,832
0.50	1,245	1,04
0.60	1,495	1,245
0.70	1,74	1,455
0.80	1,99	1,66

Para el cálculo del tiempo  $\tau_1$  correspondiente al ángulo crítico  $\delta_{s1}$ , es preciso integrar la ecuación (48) para los valores particulares indicados en las tablas II y III. Esto está efectuado por el aparato que se cita al hablar de esta ecuación (apartado B-d), cuyos resultados están representados gráficamente en las cur-

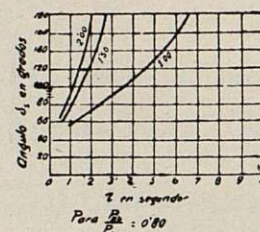
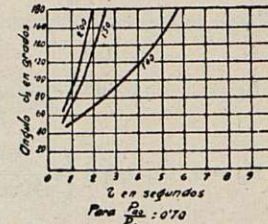
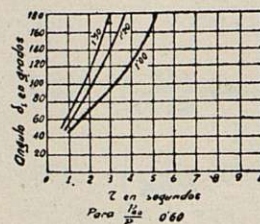
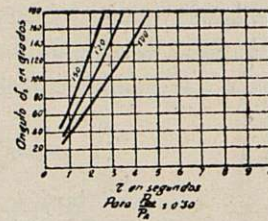
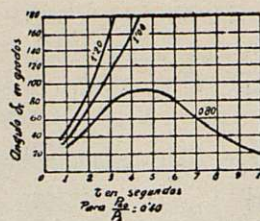


Gráfico 3. Curvas relacionando el desplazamiento angular  $\delta_s$  y el tiempo base  $\tau$ . Las curvas son para los valores  $\frac{P_{ao}}{P_A}$ , que se indican al lado de las mismas.

vas del gráfico 3, aquí reproducido. Los valores de  $\tau_1$  así hallados, son los siguientes:

Tabla IV

Carga inicial	VALORES DE $\tau_1$	
	Para dos fases a tierra	Para c/c entre fases
0.40	3.2	
0.50	2	2.8
0.60	1.3	1.8
0.70	0.9	1.1
0.80	0.40	0.5

Por no poseer datos de las constantes de inercia de todas las máquinas, tomaremos como tales valores aproximados, basados en los que generalmente poseen<sup>14</sup>; éstos son los siguientes:

Generadores hidráulicos.....	6 segundos.
Condensadores síncronos.....	3 »
Motores síncronos.....	4,5 »
Motores de inducción.....	1 »

Teniendo en cuenta que tomamos como potencia base 45.000 KVA., tendremos:

1.º La constante  $M_1$ , de la máquina que representa



Central Z, será de seis segundos, ya que la potencia de esta Central es precisamente la que se toma como base.

2.º Las constantes de inercia de las demás centrales referidas a la potencia base serán las siguientes:

Generadores hidráulicos:

$$6 \times \frac{247.777 + 63.000}{45.000} = 41,5 \text{ seg.}$$

Condensadores síncronos:

$$3 \times \frac{90.500}{45.000} = 6 \text{ seg.}$$

Motores síncronos:

$$4,5 \times \frac{57.940}{45.000} = 5,8 \text{ seg.}$$

Motores de inducción:

$$1 \times \frac{230.000}{45.000} = 5,1 \text{ seg.}$$

Total 58,4 seg.

3.º Según el punto anterior, la constante de inercia  $M_2$ , de la máquina 2, será de 58,4 segundos.

4.º Aplicando la fórmula (42) se encuentra para

$$M_s = \frac{6 \times 58,4}{6 + 58,4} = 5,44 \text{ seg.} \quad (123)$$

Para determinar los valores del tiempo crítico  $t_1$ , basta aplicar la fórmula (49), y se obtiene:

$$t_1 = \frac{\tau_1}{\sqrt{\frac{2\pi \times 50}{5,44} P_B}} \quad (124)$$

en la que hay que medir  $P_B$  en tanto por uno de 45.000 kilovatios. Para encontrar los valores de  $P_B$ , basta fijarse que:

$$P_B = \frac{P_{ao}}{P_B} \quad (125)$$

y mediante el gráfico 4 y la tabla III es fácil hallar los siguientes resultados:

Las tablas IV y V dan los valores necesarios para aplicar la fórmula (124) y calcular  $t_1$ , resultando las curvas indicadas en el gráfico 5, las cuales relacionan

el límite de potencia y el tiempo empleado en la eliminación del defecto.

Tabla V

CARGA INICIAL			VALORES DE $P_B$ EN TANTO POR UNO	
Relativa	En KW	En tanto por uno	Para dos fases a tierra	Para c/c entre fases
0,40	45.000	1	1,005	1,2
0,50	62.000	1,38	1,11	1,33
0,60	80.000	1,78	1,19	1,43
0,70	107.000	2,38	1,37	1,635
0,80	145.000	3,22	1,62	1,94

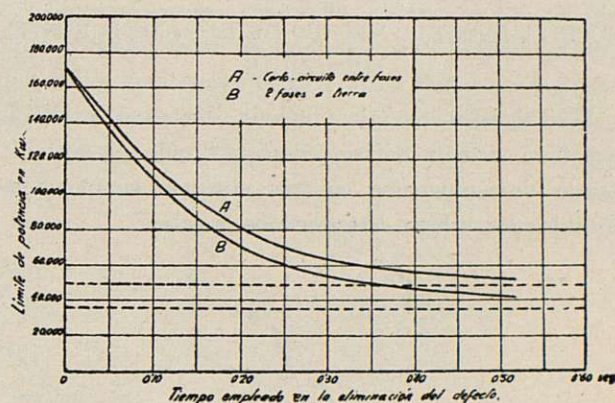


Gráfico 5.—Relación entre el límite de potencia y el tiempo empleado en la eliminación del defecto.

## E.—CONCLUSIONES

El estudio de la marcha en paralelo de las máquinas síncronas exige conocimiento completo del funcionamiento de estas máquinas, así como también del mecanismo de los cortocircuitos, ya que precisamente en los casos de defecto es cuando está más comprometida la estabilidad.

Las oscilaciones pendulares de amplitud creciente no nos conducen a ningún límite de potencia, ya que generalmente tienen lugar con cargas bajas. Además, estas oscilaciones se evitan con el empleo de circuitos amortiguadores.

De los diferentes límites de potencia que pueden considerarse, los correspondientes a los casos de cortocircuitos son los que tienen más interés práctico, ya que son los de valor más bajo.

Una red en miniatura puede ser un poderoso instrumento para determinar cualquier límite de potencia.



La tendencia moderna tiende a reducir el tiempo de la eliminación de los defectos, lo que contribuye poderosamente a aumentar el límite de potencia.

En los generadores hidráulicos es aconsejable la instalación de potentes circuitos amortiguadores, ya que favorecen mucho a la estabilidad de la marcha en paralelo y la sincronización espontánea, y aumentan el lapso que las máquinas pueden aguantar la marcha asincrónica sin calentamiento peligroso.

## APÉNDICE I

### SUCINTA IDEA DEL MÉTODO DE LAS «COMPONENTES SIMÉTRICAS»

El insigne matemático Stokvis, demostró en 1914, que todo sistema trifásico desequilibrado de vectores puede descomponerse en tres sistemas componentes equilibrados y bien determinados, a saber:

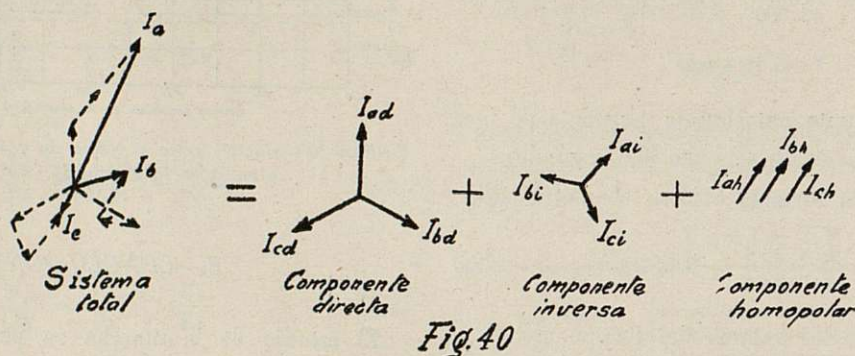
equilibrado, cuyas fases están situadas en el orden inverso del sistema total.

**Componente homopolar.**—Que es un sistema monofásico formado por tres vectores iguales en magnitud y en fase, correspondiendo uno a cada fase.

La figura 40 representa un ejemplo de esta descomposición; obsérvese cómo al sumar vectorialmente los vectores  $I_{ad}$ ,  $I_{ai}$ ,  $I_{ah}$ , correspondientes a la fase  $a$ , uno en cada componente, se encuentra el vector  $I_a$  del sistema total. Puede decirse lo mismo de los vectores correspondientes a las otras dos fases  $b$  y  $c$ .

El método de «Componentes simétricas» se basa en este teorema. En 1918, Mr. Fortescue <sup>16</sup> presentó en el A. I. E. E. un extenso trabajo sobre este método aplicado a redes polifásicas en general. La aplicación de este método se ha hecho cada día más extensa, pudiendo considerarse como imprescindible para el estudio de todo problema de desequilibrio trifásico.

Vamos ahora a dar una idea de la aplicación del mé-

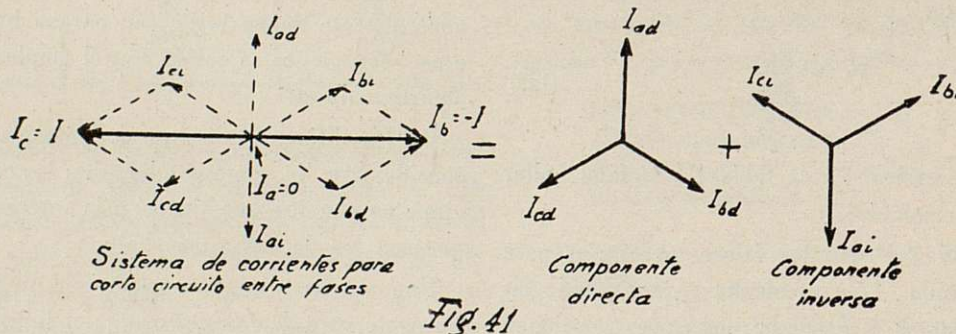


**Componente directa.**—Que es un sistema trifásico equilibrado, cuyas fases están situadas en el mismo orden que el sistema total.

**Componente inversa.**—Que es un sistema trifásico

todo al cálculo de cortocircuito monofásicos y bifásicos en redes trifásicas.

**Cortocircuito entre dos fases.**—Supóngase que el cortocircuito es entre las fases  $b$  y  $c$ : la corriente  $I_a$





de la fase *a* será nula, y la de las *b* y *c* serán, respectivamente,  $I_b = I$ , e,  $I_c = -I$ . Al descomponerse este sistema de corrientes en las «Componentes simétricas» (fig. 41), se encuentran iguales y de signo contrario las componentes directa e inversa y nula la componente homopolar.

*Una fase a tierra.*—Suponiendo que el cortocircuito es entre fase *a* y tierra; la corriente  $I_a$  de la fase *a* valdrá  $I$  y las corrientes  $I_b$  e  $I_c$  correspondientes a las otras dos fases, serán nulas. Al descomponer este sistema de corrientes en las «Componentes simétricas» (fig. 42), se encuentran iguales en magnitud y en fase las tres componentes directa, inversa y homopolar.

La manera de comportarse cada aparato que forma el sistema (máquinas, transformadores, líneas, etc.) es

Todo aparato estático, como transformadores y líneas, ofrecen a estas corrientes una impedancia igual a la normal.

*Corrientes de componente homopolar.*—Estas corrientes sólo pueden circular por las máquinas cuyo neutro está conectado, no originan ningún campo giratorio, y dan lugar a una reactancia que es inferior a la normal. Si no reaccionan con el campo del rotor, no dan par, por lo que no hay que tenerlas en cuenta en la estabilidad de las máquinas.

Para que los transformadores estáticos puedan dejar paso a estas corrientes, precisan dos condiciones: 1.<sup>a</sup> Tener el neutro conectado a tierra, y 2.<sup>a</sup> Ser de flujo forzado, tener un devanado en triángulo o bien que el devanado cuyo neutro está a tierra sea zig-zag. Todo transformador que no tenga estas dos condicio-

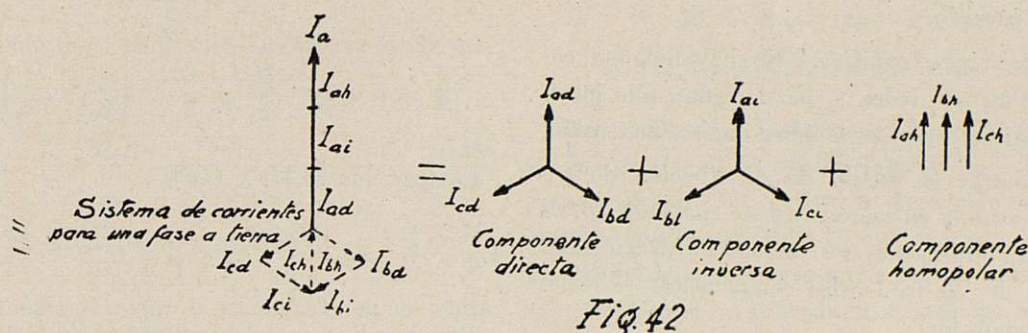


Fig. 42

distinto para cada uno de los sistemas de corrientes componentes, a saber:

*Corrientes de componente directa.*—Como constituyen un sistema trifásico normal, las impedancias que encuentran serán las normales. Estas corrientes forman en las máquinas un campo que gira a la misma velocidad y en el mismo sentido que el rotor, y, por lo tanto, reaccionan con el campo de éste, originando el par resistente. Esto nos indica que estas corrientes tienen influencia en la estabilidad de las máquinas.

*Corrientes de componente inversa.*—Como forman un sistema trifásico cuyas fases giran en sentido contrario al normal, originan en las máquinas un campo que gira en sentido contrario que el rotor, dando lugar a una reactancia distinta de la normal. Además, como estas corrientes no reaccionan en el campo del rotor, no dan par, y no hay que tenerlas en cuenta en la estabilidad de las máquinas.

nes, presenta una impedancia prácticamente infinita al paso de estas corrientes.

Para las líneas de transmisión, el valor de la reactancia que presentan a estas corrientes depende de que la conexión a tierra de los neutros sea más o menos eficaz. Se puede tomar como valor práctico aproximado el de cuatro veces la reactancia normal.

Así, como la red real se comporta de distinta manera para cada corriente componente, esta red se substituye por las tres redes hipotéticas componentes que se indican a continuación:

*Red directa.*—Que está formada por la componente directa de la corriente y de la tensión, cuyas impedancias serán las directas de los circuitos y aparatos.

*Red inversa.*—Formada por la componente inversa de la corriente y de la tensión y de las impedancias inversas de los circuitos y aparatos.

*Red homopolar.*—Formada correlativamente por la



componente homopolar de la corriente y de la tensión y de las impedancias homopolares de los circuitos y aparatos.

Al superponer los estados de estas tres redes componentes se obtiene el estado de distribución de corrientes y tensiones de la red real.

Al presentarse un cortocircuito, cada una de estas tres redes componentes quedan conectadas a tierra en el punto del defecto, y quedan acopladas entre sí en la forma siguiente:

*Para una fase a tierra.*—Las tres redes componentes quedan conectadas en serie.

*Para cortocircuito entre dos fases.*—Quedan conectadas en serie las redes directa e inversa, y no interviniendo la homopolar.

*Para dos fases a tierra.*—Las tres redes quedan conectadas en paralelo.

*Para cortocircuito trifásico.*—No hay ninguna conexión entre las tres redes, y, por lo tanto, sólo interviene la red directa, por ser la única que recibe tensión.

Para encontrar el estado de distribución de corrientes y tensiones en la red real en cualquier cortocircuito basta superponer los estados de distribución encontrados de las tres redes componentes (directa, inversa y homopolar).

## APÉNDICE II

### SUBSTITUCIÓN DE DOS MÁQUINAS POR OTRA FICTICIA EQUIVALENTE

Supongamos que las dos máquinas 2 y 3 (fig. 43), se desea sustituirlas por otra de ficticia equivalente 2f

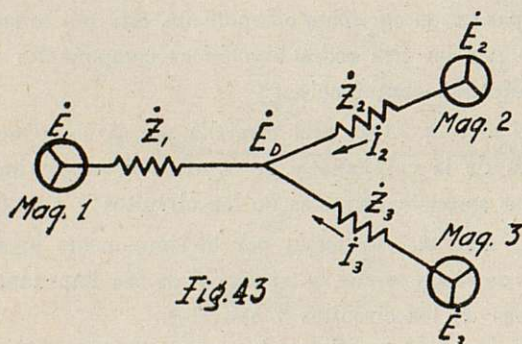


Fig. 43

(fig. 44). Esta máquina deberá ser tal que debe dar la misma tensión en el punto D y la misma corriente

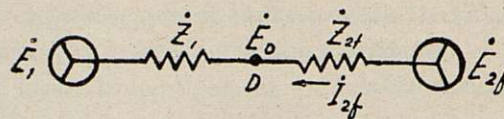


Fig. 44

hacia la máquina 1: expresando estas características matemáticamente, se tiene:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2 - \dot{E}_D}{\dot{Z}_2} \quad (126)$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{E}_3 - \dot{E}_D}{\dot{Z}_3} \quad (127)$$

$$\dot{I}_{2f} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_D}{\dot{Z}_{2f}} \quad (128)$$

$$\dot{I}_{2f} = \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_2} + \frac{\dot{E}_3}{\dot{Z}_3} - \left( \frac{1}{\dot{Z}_2} + \frac{1}{\dot{Z}_3} \right) \dot{E}_D \quad (129)$$

Comparando (128) y (129)

$$\dot{E}_{2f} = \frac{\dot{Z}_{2f}}{\dot{Z}_2} \dot{E}_2 + \frac{\dot{Z}_{2f}}{\dot{Z}_3} \dot{E}_3 + \left( 1 - \frac{\dot{Z}_{2f}}{\dot{Z}_2} - \frac{\dot{Z}_{2f}}{\dot{Z}_3} \right) \dot{E}_D \quad (130)$$

Para que  $\dot{E}_{2f}$  sea independiente de  $\dot{E}_D$  es preciso que:

$$1 - \frac{\dot{Z}_{2f}}{\dot{Z}_2} - \frac{\dot{Z}_{2f}}{\dot{Z}_3} = 0 \quad (131)$$

resultando:

$$\dot{Z}_{2f} = \frac{\dot{Z}_2 \dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} \quad (132)$$

y la (130) queda transformada en:

$$\dot{E}_{2f} = \frac{\dot{Z}_3 \dot{E}_2 + \dot{Z}_2 \dot{E}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} \quad (133)$$

Estas fórmulas (132) y (133) permiten substituir las máquinas 2 y 3 por otra ficticia equivalente.

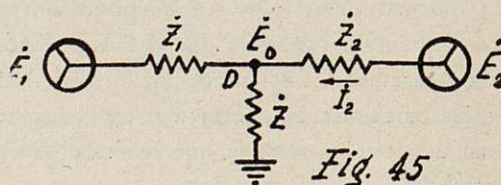


Fig. 45



En el caso de dos máquinas 1 y 2 (fig. 45), con una derivación intermedia en el punto D, puede eliminarse esta derivación considerándola como una ter-

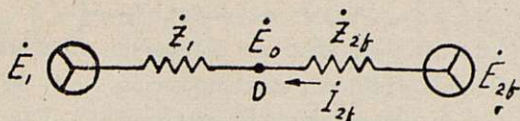


Fig. 46

cera máquina con su tensión interior nula, y según el método que se acaba de exponer, substituir las máquinas 2 y 3 por otra ficticia equivalente. Entonces las características de las máquinas serán:

$$E_3 = 0$$

$$\dot{Z}_3 = \dot{Z}$$

y substituyendo estos valores en las (132) y (133), tendremos:

$$Z_{1f} = \frac{\dot{Z}\dot{Z}_2}{\dot{Z} + \dot{Z}_2} \quad (134)$$

$$\dot{E}_1 = \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + \dot{Z}_2} \dot{E}_2 \quad (135)$$

las que permiten eliminar la derivación en el punto D, quedando reducido al caso de la figura 46.

### APÉNDICE III

#### COMPLICACIÓN QUE SE PRESENTA EN LOS CÁLCULOS AL TENER EN CUENTA LAS DIFERENCIAS ENTRE LAS REACTANCIAS EN FASE Y EN CUADRATURA DE LAS MÁQUINAS

Para tener en cuenta el diferente valor entre la reactancia en fase y en cuadratura, recurriremos al diagrama de funcionamiento de una máquina (fig. 47).

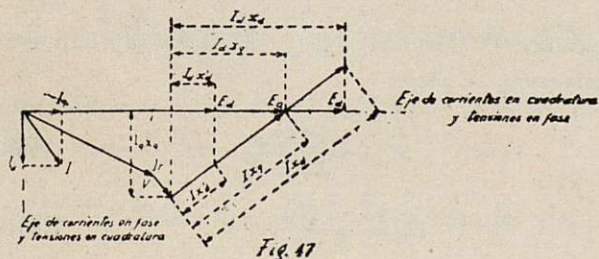


Fig. 47

despreciando la resistencia óhmica del inducido, según el cual la potencia eléctrica vale:

$$P_e = E_Q I_Q \quad (136)$$

Pero al tener lugar un cambio de condiciones en las máquinas, la tensión que se conserva constante no es la  $E_Q$ , sino que es la  $E_d$  o la  $E'_d$ , según se trate de un cambio de régimen permanente o de una perturbación. Las relaciones que existen entre estas tres tensiones interiores (fig. 47) vienen determinadas por:

$$E_d = E_Q + (x_d - x_q) I_d \quad (137)$$

$$E'_d = E_Q - (x_q - x'_d) I_d \quad (138)$$

$$E_d = E'_d + (x_d - x'_d) I_d \quad (139)$$

Estas tres fórmulas aplicadas a la máquina 1 son:

$$E_{1d} = E_{1Q} + (x_{1d} - x_{1q}) I_{1d} \quad (140)$$

$$E'_{1d} = E_{1Q} - (x_{1q} - x'_{1d}) I_{1d} \quad (141)$$

$$E_{1d} = E'_{1d} + (x_{1d} - x'_{1d}) I_{1d} \quad (142)$$

Para expresar la potencia eléctrica de una máquina en función de la tensión interior  $E_d$  ó  $E'_d$ , supondremos el caso de un sistema de  $n$  máquinas y consideraremos la máquina 1 cuya corriente en fase de  $I_{1d}$  puede descomponerse en la forma indicada en la (1) y siguiendo un procedimiento análogo al del apartado (B-a),  $I_{1d}$  queda expresada en función de las tensiones interiores  $E_{1Q}, E_{2Q}, E_{3Q}, \dots, E_{nQ}$  de las máquinas, de los desfases que forman estas tensiones y de la impedancia de sincronización e indiferente. Substituyendo el valor de  $I_{1d}$  así obtenido, en la (140) y (141), se encuentra:

$$E_{1d} = F(E_{1Q}, E_{2Q}, \dots, E_{nQ}) \quad (143)$$

$$E'_{1d} = F'(E_{1Q}, E_{2Q}, \dots, E_{nQ}) \quad (144)$$

Según se quiera expresar la potencia eléctrica en función de  $E_{1d}$  ó  $E'_{1d}$  tomaremos la (143) ó (144). Supongamos se trata del primero de estos casos, entonces la (143) puede repetirse para cada máquina y las ecuaciones que se obtendrán formarán un sistema, del que se podrán despejar las  $n$  incógnitas,

$$E_{1Q}, E_{2Q}, E_{3Q}, \dots, E_{nQ} \quad (145)$$

en función de

$$E_{1d}, E_{1d}, E_{3d}, \dots, E_{nd} \quad (146)$$



Las tensiones interiores que nos dan la potencia son precisamente las (145), y como se quiere tener en cuenta el diferente valor de reactancia en fase y en cuadratura, se aplicará la fórmula (8) tomando para  $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$  los valores (145) en función de los (146) y tomando las reactancias en cuadratura de las máquinas. De este modo quedará expresada la potencia en función de las tensiones interiores  $E_{1d}$ ,  $E_{2d}$  ...  $E_{nd}$ .

Hemos indicado el camino, pero no creemos necesario detallarlo matemáticamente, pues se llega a expresiones muy complicadas debido al gran número de términos que contienen <sup>24</sup>. Estas expresiones aún se-

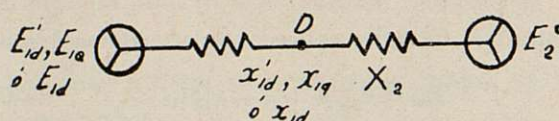


Fig. 48

rían más complicadas si se quisiera tener en cuenta las resistencias óhmicas. Aún en el caso de dos máquinas, despreciando estas resistencias óhmicas, esta expresión contiene muchos términos, lo que dificulta su aplicación práctica de gran manera.

No obstante, obsérvese que al considerar iguales las reactancias en fase y cuadratura, el error que se comete es generalmente admisible, ya que el valor de las demás reactancias de la red superan al de las máquinas.

Finalmente, para ver cómo influye el diferente valor entre estas reactancias, vamos a detallar el caso

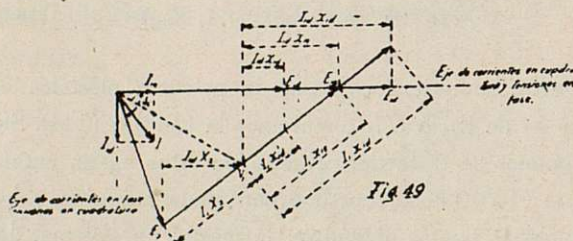


Fig. 49

más sencillo que puede considerarse, que es el de una sola máquina despreciando la resistencia óhmica del inducido, conectada a través de una reactancia a una fuente de tensión constante  $E_2$  (fig. 48). Este caso

ideal puede considerarse como el de dos máquinas 1 y 2, considerando diferentes valores entre las reactancias en fase y en cuadratura de la máquina 1 e iguales valores para las correspondientes a la máquina 2.

En este caso, en lugar de obtener la corriente  $I_{1d}$  de la fórmula (140) por descomposición, según la fórmula (1), la obtendremos directamente del diagrama de funcionamiento (fig. 49), por creerlo más cómodo. Así, tendremos:

$$E_{1d} = E_2 \cos \delta_s + (x_{1d} + X_2) I_{1d} \quad (147)$$

Eliminando  $I_{1d}$  entre esta ecuación (147) y la (140), se halla:

$$E_{1Q} = \frac{x_{1q} + X_2}{x_{1d} + X_2} E_{1d} + \frac{x_{1d} - x_{1q}}{x_{1d} + X_2} E_2 \cos \delta_s \quad (148)$$

Aplicando la fórmula (16) a este caso, se tiene:

$$P_1 = \frac{E_{1Q} E_2}{x_{1q} + X_2} \sin \delta_s \quad (149)$$

y substituyendo el valor de  $E_{1Q}$  encontrado en la fórmula (148), se obtiene:

$$P_1 = \frac{E_{1d} E_2}{x_{1d} + X_2} \sin \delta_s + \frac{x_{1d} - x_{1q}}{2(x_{1q} + X_2)(x_{1d} + X_2)} E_2^2 \sin 2\delta_s \quad (149)$$

En caso de existir una derivación a tierra en el punto D (fig. 50), aplicando el método indicado en el

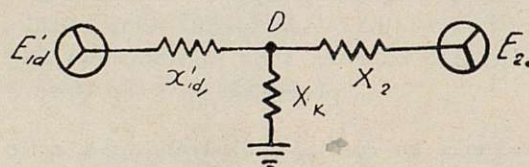


Fig. 50

Apéndice II (fórmulas 134 y 135) para suprimir esta derivación, se tiene:

$$X_{2f} = \frac{X_2 X_k}{X_2 + X_k} \quad (150)$$

$$E_{2f} = \frac{X_k}{X_2 + X_k} E_2 \quad (151)$$



quedando el caso reducido al de la figura 51 sin derivación intermedia.

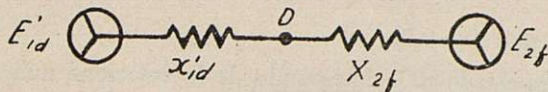


Fig 51

Aplicando ahora la fórmula (149) a este caso, se halla:

$$P_1 = \frac{E_{1d}E_{2f}}{x_{1d} + X_{2f}} \sin \delta_s + \frac{x_{1d} - x_{1q}}{2(x_{1q} + X_{2f})(x_{1d} + X_{2f})} E_{2f}^2 \sin 2\delta_s \quad (152)$$

y substituyendo los valores indicados en (150) y (151), se encuentra:

$$P_1 = \frac{E_{1d}E_{2f}}{x_{1d} + X_2 + \frac{x_{1d}X_2}{X_k}} \sin \delta_s + \frac{x_{1d} - x_{1q}}{2\left(x_{1q} + X_2 + \frac{x_{1q}X_2}{X_k}\right)\left(x_{1d} + X_2 + \frac{x_{1d}X_2}{X_k}\right)} E_{2f}^2 \sin 2\delta_s$$

Obsérvese que las reactancias de sincronización entre estas dos máquinas ideales, valen:

$$X_d = x_{1d} + X_2 + \frac{x_{1d}X_2}{X_k} \quad (154)$$

$$X_q = x_{1q} + X_2 + \frac{x_{1q}X_2}{X_k} \quad (155)$$

$$X'_d = x'_{1d} + X_2 + \frac{x'_{1d}X_2}{X_k} \quad (156)$$

$$X_d - X_q = x_{1d} - x_{1q} \quad (157)$$

$$X_q - X'_d = x_{1q} - x'_{1d} \quad (158)$$

De este modo la fórmula (153) se convierte en:

$$P_1 = \frac{E_{1d}E_{2f}}{X'_d} \sin \delta_s + \frac{X_d - X_q}{2X_dX_q} E_{2f}^2 \sin 2\delta_s \quad (159)$$

Análogamente se puede obtener  $P_1$  en función de  $E'_{1d}$  en lugar de  $E_{1d}$  y se halla:

$$P_1 = \frac{E'_{1d}E_{2f}}{X'_d} \sin \delta_s - \frac{X_q - X'_d}{2X'_dX_q} E_{2f}^2 \sin 2\delta_s \quad (160)$$

En caso de tratarse de máquinas de rotor cilíndrico o si esto se admite como una hipótesis simplificada, por despreciar el efecto de los polos salientes, tendremos:

$$x_{1q} = x_{1d} \quad (161)$$

$$X_q = X_d \quad (162)$$

$$P_1 = \frac{E_{1d}E_{2f}}{X_d} \sin \delta_s \quad (163)$$

En el método de las áreas, cuando se emplea para estudiar perturbaciones, como debe expresarse la potencia  $P_1$  en función de  $E'_{1d}$  y no de  $E_{1d}$ , debe considerarse la fórmula (160) y al admitir iguales las reactivancias en fase y en cuadratura  $X_q = X'_d$ , se anula el segundo término de esta fórmula, resultando:

$$P_1 = \frac{E'_{1d}E_{2f}}{X'_d} \sin \delta_s \quad (164)$$

#### APÉNDICE IV

##### RELACIÓN ENTRE TIEMPO Y DESPLAZAMIENTO ANGULAR. CONSTANTE DE INERCIA

En todo sistema mecánico dotado de movimiento, las relaciones que existen entre las cantidades cinemáticas y las fuerzas o pares vienen determinadas por unas constantes que representan la inercia de las masas en movimiento. En el caso que nos ocupa las mecánicas están dotadas únicamente de movimiento de rotación y entonces sólo existe una sola constante que representa al momento de inercia de la masa giratoria.

El valor numérico que mide este momento de inercia depende del sistema de unidades que se adopte; en los problemas prácticos de mecánica se emplea el llamado  $PD^2$  por adoptarse mejor al sistema de unidades que se acostumbra emplear en la práctica. En cambio, bien distinto es el sistema de unidades generalmente adoptado en los problemas de los sistemas eléctricos de producción, transmisión, distribución, en el cual se acostumbra a medir cada cantidad en tanto por ciento o por uno de un cierto valor tomado como base.

Seguiremos el sistema de unidades iniciado por Mrs. Doherty and Nickle en sus interesantes artículos sobre la máquina sincrónica (Transactions A. I. E. E. 1926-1927), los que representan cada va-



riable en tanto por uno de su valor correspondiente al funcionamiento normal de la máquina. En este sistema la mayoría de características vienen representadas por fracciones decimales; pero tienen la ventaja, sobre el sistema de tanto por ciento, de no tener que emplear el factor 100.

En los problemas de los sistemas eléctricos hay que considerar cada máquina como una parte de todo el conjunto del sistema, y adoptando las unidades de tanto por uno cada variable vendrá representada en tanto por uno de un cierto valor tomado como base. En el ejemplo de la parte D se pueden fijar las ideas sobre este particular.

En toda masa giratoria la relación entre el par y velocidad angular viene representada matemáticamente por una ecuación de la forma:

$$T_r = M \frac{d\omega}{dt} \quad (165)$$

en la que M es la constante que representa el efecto de la inercia.

Si consideramos esta fórmula aplicada a una máquina cuya constante M se quiere determinar en el sistema de unidades de tanto por uno, se tendrá como unidades de  $\omega$  y  $T_r$  la velocidad de funcionamiento normal de la máquina y el par correspondiente a esta velocidad con la plena carga. Despejando ahora  $dt$  de la (165) e integrando entre  $\omega = 0$  y  $\omega = 1$ , se tiene:

$$\int_0^{t_n} dt = \frac{M}{T_r} \int_0^1 d\omega = \frac{M}{T_r} \quad (166)$$

como se supone  $T_r$  constante e igual a la unidad, se tiene:

$$M = t_n \quad (167)$$

Esto nos dice que la constante de inercia M es el tiempo en segundos que tardaría la máquina en adquirir su velocidad normal, partiendo del reposo y al aplicarle un par constante e igual al correspondiente a la plena carga, o lo que es lo mismo, el número de segundos que emplearía la máquina en pararse completamente partiendo de su funcionamiento normal a plena carga, suponiendo que su par resistente permaneciera constante.

Para encontrar la relación entre la constante de inercia M y el  $PD^2$  basta aplicar la ecuación (165) al caso particular de haber un par constante e igual al

correspondiente a plena carga, empleando el sistema práctico de unidades mecánicas. Así se obtiene:

$$T_n = \frac{PD^2}{4g} \frac{d\omega'}{dt} \quad (168)$$

en la que  $g = 9,81$ .

Despejando  $dt$  e integrando de la velocidad nula a la normal:

$$\int_0^{t_n} dt = \frac{PD^2}{4gT_n} \int_0^{\omega'_n} d\omega' = \frac{PD^2}{4g} \cdot \frac{\omega'_n}{T_n} \quad (169)$$

pasando de pares a potencia y recordando la (167)

$$M = \frac{PD^2}{4g} \frac{\omega'^2_n}{P_n} = \frac{PD^2}{4g} \frac{\left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2}{P_n} = \frac{0,00274}{g} n^2 \frac{PD^2}{P_n} \quad (170)$$

En esta fórmula la potencia  $P_n$  viene medida en kilográmetros por segundo; si se quiere pasar a Kw. como esta unidad contiene 1.000/9,81 Kgm./seg., la fórmula (170) se convierte en:

$$M = 2,74 \cdot 10^{-6} n^2 \frac{PD^2}{P_n} \quad (171)$$

La potencia  $P_n$  es la de plena carga de la máquina, la cual se toma como base para expresar la constante de inercia y las reactancias de la misma; pero como en los problemas de los sistemas eléctricos debe considerarse una máquina como una parte de todo el conjunto del sistema, hay necesidad de medir todas las reactancias y constantes de inercia mediante una misma potencia base; entonces en la fórmula (171),  $P_n$  será esta potencia base.

Cuando el rotor de una máquina entra en oscilación, podemos referir el movimiento del rotor a unos ejes animados de la velocidad angular  $\omega'_n$  de funcionamiento normal, pudiendo escribir como valor de la velocidad absoluta de la masa giratoria

$$\omega' = \omega'_n + \frac{1}{p} \frac{d\delta}{dt} \quad (172)$$

esta velocidad angular expresada en tanto por uno vale:

$$\omega = \frac{\omega'}{\omega'_n} = 1 + \frac{1}{p\omega'_n} \frac{d\delta}{dt} = 1 + \frac{1}{2\pi f} \frac{d\delta}{dt} \quad (173)$$

Substituyendo esta ecuación en la (165), se tiene:

$$T_r = \frac{M}{2\pi f} \frac{a^2 \delta}{dt^2} \quad (174)$$



en la que  $T_r$  es el par resultante de todos los que actúan sobre el rotor, el cual debe medirse en tanto por uno del par correspondiente a la potencia base y con la velocidad normal de funcionamiento.

## APÉNDICE V

### DEDUCCIÓN DE LAS FÓRMULAS PARA EL MÉTODO DE LAS ETAPAS SUCESIVAS, DESPRECIANDO EL EFECTO DE TODO CIRCUITO AMORTIGUADOR

#### a) Determinación de los incrementos angulares $\Delta \delta$ .

Como se admite proporcionalidad entre pares y potencia y se emplea el sistema de unidades de tanto por uno, estas dos cantidades serán iguales. Así la cur-

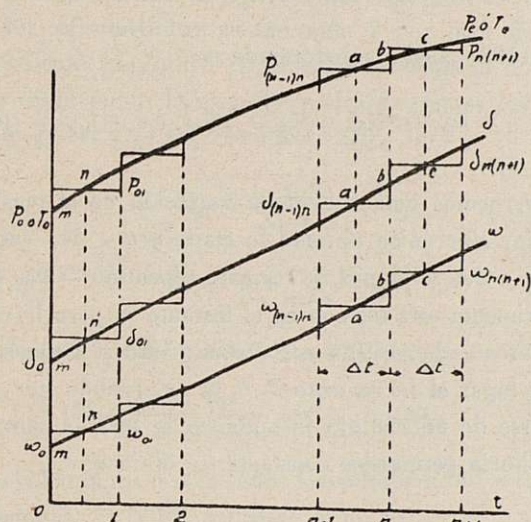


Fig. 15

va superior de la figura 15 del apartado B-e (aquí reproducida) puede representar indistintamente pares o potencias, y se tiene:

$$T_{(n-1)n} = P_{(n-1)n}$$

$$T_{n(n+1)} = P_{n(n+1)}$$

Supongamos ahora las tres curvas que dan  $T$ ,  $\delta$  y  $\omega$  en función del tiempo (fig. 15) y los instantes  $(n-1)$ ,  $(n)$  y  $(n+1)$ . Según la fórmula (165), tendremos:

$$\dot{\omega} = \frac{dt}{M} T, \quad (175)$$

Como los intervalos de tiempo de cada etapa son muy pequeños, pueden considerarse como diferenciales, y aplicando la (175) a los segmentos curvilíneos  $ab$  y  $bc$  (fig. 15), se tiene:

$$\omega_n - \omega_{(n-1)n} = \frac{\Delta t}{2M} (T_m - T_{(n-1)n}) \quad (176)$$

$$\omega_{n(n+1)} - \omega_n = \frac{\Delta t}{2M} (T_m - T_{n(n+1)}) \quad (177)$$

Sumando estas dos ecuaciones:

$$\omega_{n(n+1)} - \omega_{(n-1)n} = \frac{\Delta t}{M} \left( T_m - \frac{T_{(n-1)n} + T_{n(n+1)}}{2} \right) \quad (178)$$

Como las líneas quebradas (fig. 15) vienen de la substitución de las curvas por rectas, los incrementos del ángulo  $\delta$  que se atribuyen a los instantes  $n$  y  $(n+1)$ , son los que se han experimentado realmente durante las etapas  $(n-1)n$  y  $n(n+1)$ ; por lo tanto, tendremos:

$$\Delta \delta_{(n+1)} = \delta_{(n+1)(n+2)} - \delta_{n(n+1)} \quad (179)$$

$$\Delta \delta_n = \delta_{n(n+1)} - \delta_{(n-1)n} \quad (180)$$

y al aplicar la fórmula (173) a estas dos etapas, se tendrá:

$$\omega_{n(n+1)} = 1 + \frac{1}{2\pi f} \frac{\Delta \delta_{n+1}}{\Delta t} \quad (181)$$

$$\omega_{(n-1)n} = 1 + \frac{1}{2\pi f} \frac{\Delta \delta_n}{\Delta t} \quad (182)$$

Substituyendo estas fórmulas (181) y (182) en la (178), se halla:

$$\Delta \delta_{n+1} = \Delta \delta_n + \frac{2\pi f \Delta t^2}{M} \left( T_m - \frac{T_{(n-1)n} + T_{n(n+1)}}{2} \right) \quad (183)$$

Admitiendo proporcionalidad entre pares y potencias, ya se ha dicho que estas dos cantidades son iguales, y, por lo tanto, pueden substituirse los valores de  $T$  por  $P$ . Además, en la (183)  $\Delta \delta_{n+1}$  y  $\Delta \delta_n$  vienen medidos en radianes, y si queremos que en la nueva fórmula vengan medidos en grados sexagesimales, tendremos:

$$\Delta \delta_{n+1} = \Delta \delta_n + \frac{360 f \Delta t^2}{M} \left( P_m - \frac{P_{(n-1)n} + P_{n(n+1)}}{2} \right) \quad (184)$$

Para deducir la fórmula correspondiente a la primera etapa basta seguir el mismo procedimiento, apli-



cando análogamente la fórmula (175) al segmento curvilíneo  $mn$  (fig. 15), y se halla:

$$\omega_{01} - \omega_0 = \frac{\Delta t}{2M} (T_m - T_0)$$

y las fórmulas (181, 182, 183 y 184) quedan análogamente convertidas en las siguientes:

$$\omega_{01} = 1 + \frac{1}{2\pi f} \frac{\Delta \delta_1}{\Delta t}$$

$$\omega_0 = 1$$

$$\Delta \delta_1 = \frac{2\pi/\Delta t^2}{M} \frac{T_m - T_0}{2} \quad (185)$$

$$\Delta \delta_1 = \frac{360/\Delta t^2}{M} \frac{P_m - P_0}{2} \quad (186)$$

b) *Variación de la corriente de excitación y de la tensión interior sincrónica.*

El circuito de excitación de una máquina está formado por resistencia óhmica y fuerte autoinducción, en el que se le aplica una tensión continua. La corriente que circula por todo circuito de esta naturaleza viene determinada por una ecuación de la forma:

$$i = A + B e^{-\frac{t}{T_d}} \quad (187)$$

en la que A y B son constantes.

Para  $t = 0$  y  $t = \infty$ , se tiene, respectivamente:

$$i_0 = A + B \quad (188)$$

$$i_\infty = A \quad (189)$$

Eliminando A y B entre las (187), (188) y (189), resulta:

$$i = i_\infty + (i_0 - i_\infty) e^{-\frac{t}{T_d}} \quad (190)$$

Aplicando esta fórmula a la etapa  $n(n+1)$ , teniendo en cuenta que se toma el sistema de unidades de tanto por uno, se verifica que la  $i_\infty = v_{n(n+1)}$  y que además  $i_0 = i_n$  y se tiene

$$i_{n+1} = v_{n(n+1)} + (i_n - v_{n(n+1)}) e^{-\frac{\Delta t}{T_d}} \quad (191)$$

Desarrollando en serie  $e^{-\frac{\Delta t}{T_d}}$  y considerando es

suficiente aproximado el tomar solamente los dos primeros términos, tendremos:

$$e^{-\frac{\Delta t}{T_d}} = 1 - \frac{\Delta t}{T_d} \quad (192)$$

y la (191) queda transformada en:

$$i_{n+1} = i_n - (i_n - v_{n(n+1)}) \frac{\Delta t}{T_d} \quad (193)$$

fórmula que nos da la variación de la corriente de excitación en la etapa  $n(n+1)$ , que viene expresada en unidades de tanto por uno. Como en este sistema de unidades las tensiones interiores sincrónicas son iguales a las corrientes totales de excitación, se tendrá:

$$i_n = E_{dn} + \Delta E_{dn} \quad (194)$$

$$i_{n+1} = E_{d(n+1)} \quad (195)$$

y la (193) queda transformada en:

$$E_{d(n+1)} = E_{dn} + \Delta E_{dn} - (E_{dn} + \Delta E_{dn} - v_{n(n+1)}) \frac{\Delta t}{T_d} \quad (196)$$

Así, hemos determinado la variación de la tensión interior sincrónica durante la etapa  $n(n+1)$ ; vamos ahora a determinar el incremento repentino  $\Delta E_{dn}$  que experimenta esta tensión en el instante  $n$ , para lo cual aplicaremos la (139) a este instante antes y después de tener lugar el incremento  $\Delta \delta_n$  y recordando que por tratarse de un cambio instantáneo la tensión interior transitoria permanece constante, se obtiene:

$$E_{dn} = E'_{dn} + (x_d - x'_d) I_{d(n-1)n} \quad (197)$$

$$E_{dn} + \Delta E_{dn} = E'_{dn} + (x_d - x'_d) (I_{d(n-1)n} + \Delta I_{dn}) \quad (198)$$

Restando estas dos, resulta:

$$\Delta E_{dn} = (x_d - x'_d) \Delta I_{dn} \quad (199)$$

Esta fórmula, aplicada a la máquina 1, es:

$$\Delta E_{1dn} = (x_{1d} - x'_{1d}) \Delta I_{1dn} \quad (200)$$

Para el caso ideal de dos máquinas, 1 y 2, despreciando las resistencias óhmicas, suponiendo constante la tensión interior  $E_2$  de la máquina 2 y suponiendo no existen derivaciones intermedias (fig. 48) deduci-



remos del diagrama de funcionamiento correspondiente (fig. 49):

$$E'_{1d} = E_2 \cos \delta_s + (x'_{1d} + X_2)I_{1d} \quad (201)$$

$$I_{1d} = \frac{E'_{1d} - E_2 \cos \delta_s}{x'_{1d} + X_2} \quad (202)$$

Derivando respecto a  $\delta_s$  y recordando que  $E_{1d}$  y  $E_2$  permanecerán constantes, se encuentra:

$$\frac{dI_{1d}}{d\delta_s} = \frac{E_2}{x'_{1d} + X_2} \sin \delta_s \quad (203)$$

$$\Delta I_{1d} = \frac{E_2}{x'_{1d} + X_2} \sin \delta_s \Delta \delta_s \quad (204)$$

Aplicando esta fórmula al instante  $n$ , tendremos:

$$\Delta I_{1dn} = \frac{E_2}{x'_{1d} + X_2} \sin \delta_{s(n-1)n} \Delta \delta_{sn} \quad (205)$$

En caso de existir derivaciones intermedias (figura 50), se substituirá la máquina 2 por otra ficticia equivalente (Apéndice II), que no contenga la derivación en el punto D, para lo cual aplicaremos las fórmulas (134) y (135), resultando (fig. 51):

$$X_{2f} = \frac{X_2 X_k}{X_2 + X_k} \quad (206)$$

$$E_{2f} = \frac{X_k}{X_2 + X_k} E_2 \quad (207)$$

Entonces la (205), aplicada a este caso, será:

$$\Delta I_{1dn} = \frac{E_{2f}}{x'_{1d} + X_{2f}} \sin \delta_{s(n-1)n} \Delta \delta_{sn} \quad (208)$$

si se substituye en esta (208) los valores (206) y (207), recordando la (156), se tiene:

$$\Delta I_{1dn} = \frac{E_2}{X'_d} \sin \delta_{s(n-1)n} \Delta \delta_{sn} \quad (209)$$

Substituyendo este valor (209) en la (200) tendremos, finalmente:

$$\Delta E_{1dn} = \frac{x_{1d} - x'_{1d}}{X'_d} E_2 \sin \delta_{s(n-1)n} \Delta \delta_{sn} \quad (210)$$

#### c) Variación de la tensión interior transitoria.

Esta tensión permanecerá constante en todo cambio instantáneo, de modo que tendrá un solo valor para cada uno de los instantes  $n$  y  $n+1$ ; no obstante, experimentará un cambio durante cada etapa. Así, en la etapa  $n(n+1)$  pasará de  $E'_{dn}$  a  $E'_{d(n+1)}$ , y aplicando

a los instantes inicial y final de esta etapa la ecuación (139), tendremos:

$$E_{dn} + \Delta E_{dn} = E'_{dn} + (x_d - x'_d)I_{dn(n+1)} \quad (211)$$

$$E_{d(n+1)} = E'_{d(n+1)} + (x_d - x'_d)I_{dn(n+1)} \quad (212)$$

Restando estas dos, se deduce:

$$E'_{d(n+1)} - E'_{dn} = E_{d(n+1)} - (E_{dn} + \Delta E_{dn}) \quad (213)$$

Ecuación que nos dice que la tensión interior transitoria sufre durante cada etapa un incremento igual al de la tensión interior sincrónica.

#### d) Variación de la tensión interior $E_Q$ .

Para determinar el incremento  $\Delta E_{Qn}$  que sufrirá en el instante  $n$  la tensión interior ( $E_{Qn}$ ) detrás de la reactancia en cuadratura, bastará recordar que en todo cambio instantáneo  $E'_d$  permanece constante, y aplicar la ecuación (138) en el instante  $n$  antes y después del cambio, resulta:

$$E'_{dn} = E_{Qn} - (x_q - x'_d)I_{d(n-1)n} \quad (214)$$

$$E'_{dn} = E_{Qn} + \Delta E_{Qn} - (x_q - x'_d)(I_{d(n-1)n} + \Delta I_{dn}) \quad (215)$$

Restando estas dos se encuentra:

$$\Delta E_{Qn} = (x_q - x'_d)\Delta I_{dn} \quad (216)$$

Esta fórmula, aplicada a la máquina 1, será:

$$\Delta E_{1Qn} = (x_{1q} - x'_{1d})\Delta I_{1dn} \quad (217)$$

Para el caso ideal de dos máquinas, 1 y 2, despreciando las resistencias óhmicas y suponiendo constante la tensión interior  $E_2$  de la máquina 2, el incremento  $\Delta I_{1dn}$  viene determinado por la (209) y substituyendo este valor en la (217), se obtiene:

$$\Delta E_{1Qn} = \frac{x_{1q} - x'_{1d}}{X'_d} E_2 \sin \delta_{s(n-1)n} \Delta \delta_{sn} \quad (218)$$

Para determinar la variación que experimenta  $E_Q$  durante una etapa, por ejemplo, en la  $n(n+1)$ , basta aplicar la (137) al principio y final de esta etapa y se encuentra:

$$E_{dn} + \Delta E_{dn} = E_{Qn} + \Delta E_{Qn} + (x_d - x_q)I_{dn(n+1)} \quad (219)$$

$$E_{d(n+1)} = E_{Q(n+1)} + (x_d - x_q)I_{dn(n+1)} \quad (220)$$

Restando estas dos, se obtiene:

$$E_{Q(n+1)} - (E_{Qn} + \Delta E_{Qn}) = E_{d(n+1)} - (E_{dn} + \Delta E_{dn}) \quad (221)$$



la que nos dice que la tensión interior  $E_0$  detrás de la reactancia en cuadratura sufre durante cada etapa un incremento igual al de la tensión interior sincrónica.

## APÉNDICE VI

### DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DE DECRECIMIENTO

#### a) Ecuación general del circuito de excitación de una máquina.

Si empleando el sistema de unidades de tanto por uno se aplica la ley de Ohm al circuito de excitación de una máquina, se obtiene:

$$v = i + T_{do} \frac{d\Psi}{dt} \quad (222)$$

en la que  $\Psi$  es el flujo total (el concatenado más el disperso) que atraviesa el circuito y  $T_{do}$  es una constante que depende de las características del circuito.

Por emplear las unidades de tanto por uno, se verifica:

$$i = E_d \quad (223)$$

$$\Psi = E'_d \quad (224)$$

y la (222) se transforma en:

$$E_d + T_{do} \frac{dE'_d}{dt} = v \quad (225)$$

Esta es la ecuación general correspondiente al circuito de excitación de una máquina. Para el caso particular de la máquina 1, esta ecuación (225), se escribirá:

$$E_{1d} + T_{1do} \frac{dE'_{1d}}{dt} = v_1 \quad (226)$$

La relación que existe entre  $E_d$  y  $E'_d$  depende de las características de funcionamiento de la máquina.

Para el funcionamiento en vacío, se tiene:

$$E_d = E'_d \quad (227)$$

y para el funcionamiento en cortocircuito, despreciando la resistencia óhmica y designando por  $I_c$  a la corriente, la relación es la siguiente:

$$E_d = x_d I_c \quad (228)$$

$$E'_d = x'_d I_c \quad (229)$$

Para interpretar la significación de la constante  $T_{do}$  (ecuación 225), basta considerar el caso de funciona-

miento en vacío, y entonces, en virtud de la (227), la (225) se convierte en:

$$E_d + T_{do} \frac{dE_d}{dt} = v \quad (230)$$

la integral de la cual es de la forma:

$$E_d = C_0 + c_1 e^{-\frac{t}{T_{do}}} \quad (231)$$

el primer término  $C_0$  representa la corriente de excitación estacionaria y el segundo la transitoria, cuya constante de decrecimiento es precisamente  $T_{do}$  y, por lo tanto, este símbolo corresponde a la constante de decrecimiento de la tensión en vacío.

Para el caso de funcionamiento en cortocircuito (despreciando la resistencia óhmica del inducido), tendremos las ecuaciones (228) y (229), y la (225) se convierte en:

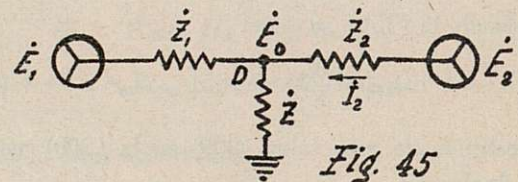
$$I_c + \frac{x'_d}{x_d} T_{do} \frac{dI_c}{dt} = \frac{v}{x_d} \quad (232)$$

Comparando esta ecuación con la (230) se comprende que daría para  $I_c$  una integral de la forma (231), pero cuya constante de decrecimiento sería:

$$T'_d = \frac{x'_d}{x_d} T_{do} \quad (233)$$

#### b) Caso ideal de dos máquinas con la tensión interior de una de ellas constante.

Supongamos ahora el caso de dos máquinas, 1 y 2, teniendo en cuenta las resistencias óhmicas y existiendo derivaciones intermedias, pero con las tensiones in-



teriores de la máquina 2 constantes. Al simplificar la red que interconecta a las dos máquinas, se reduce al esquema de la figura 45 del Apéndice IV (aquí repro-

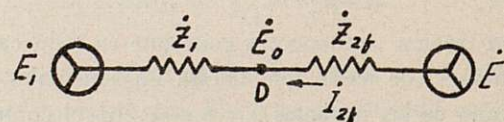


Fig. 46



ducida) y al suprimir la derivación a tierra se pasa al esquema de la figura 46 del Apéndice IV (aquí reproducida), cumpliéndose las fórmulas (134) y (135). Al acoplar las dos impedancias,  $Z_1$  y  $Z_{2f}$  en una, tendremos el esquema de la figura 52, y según las fórmulas (134) y (135), se verificará:

$$\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_{2f} = \dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}\dot{Z}_2}{\dot{Z} + \dot{Z}_2} \quad (234)$$

$$\dot{E}_{2f} = \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + \dot{Z}_2} \dot{E}_2 \quad (235)$$

Obsérvese que la fórmula (234) es idéntica a la (13), lo que demuestra que  $\dot{Z}_{11}$  es la impedancia indiferente

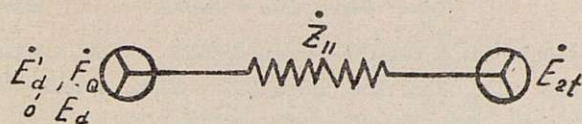


Fig. 52

de la máquina 1 y, por lo tanto, que tenemos derecho a utilizar este símbolo propio de esta clase de impedancias.

Consideraremos ahora la tensión interior detrás de la reactancia en cuadratura  $E_{2Q}$  al pasar a la máquina ficticia 2f, pasaremos a la tensión  $E_{2Q}$ , cumpliéndose la fórmula (235), por lo que resulta:

$$\dot{E}_{2Q} = \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + \dot{Z}_{2f}} \dot{E}_{2Q} \quad (236)$$

Según esta fórmula, siendo constante la  $E_{2Q}$ , la  $E_{2/Q}$  también lo será.

La impedancia  $\dot{Z}_{11}$  (fórmula (234)) está formada por la resistencia  $R_{11}$  y la reactancia  $X_{11}$ , la que puede tener los tres valores  $X_{11qq}$ ,  $X_{11dq}$  y  $X'_{11dq}$ , según se to-

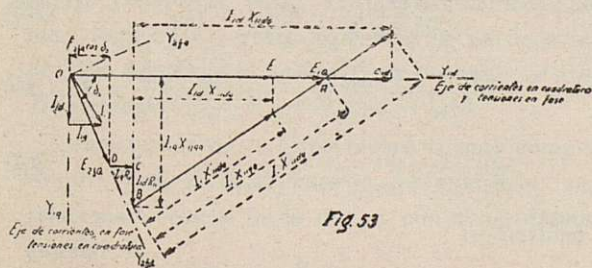


Fig. 53

men las reactancias en cuadratura, sincrónica en fase o transitoria en fase de la máquina 1, tomando siempre la reactancia en cuadratura de la máquina 2. En-

tonces, el diagrama de funcionamiento vendrá representado por la figura 53, de la que se deduce:

$$E_{1d} = E_{2/Q} \cos \delta_s + R_{11} I_{1d} + X_{11dq} I_{1q} \quad (237)$$

$$E'_{1d} = E_{2/Q} \cos \delta_s + R_{11} I_{1d} + X'_{11dq} I_{1q} \quad (238)$$

$$E_{2/Q} \sin \delta_s + R_{11} I_{1q} = X_{11qq} I_{1q} \quad (239)$$

Restando (238) y (237):

$$E'_{1d} = E_{1d} - (X_{11dq} - X'_{11dq}) I_{1q} \quad (240)$$

Derivando con respecto al tiempo  $t$  las (240), (237) y (239), recordando que  $E_{2/Q}$  se supone constante, tendremos, respectivamente:

$$\frac{dE'_{1d}}{dt} = \frac{dE_{1d}}{dt} - (X_{11dq} - X'_{11dq}) \frac{dI_{1d}}{dt} \quad (241)$$

$$\frac{dE_{1d}}{dt} = R_{11} \frac{dI_{1q}}{dt} + X_{11dq} \frac{dI_{1d}}{dt} \quad (242)$$

$$R_{11} \frac{dI_{1d}}{dt} = X_{11qq} \frac{dI_{1q}}{dt} \quad (243)$$

Eliminando  $\frac{dI_{1q}}{dt}$  entre las (242) y (243), se halla:

$$\frac{dI_{1d}}{dt} = \frac{X_{11qq}}{R_{11}^2 + X_{11dq} X_{11qq}} \frac{dE_{1d}}{dt} \quad (244)$$

Substituyendo este valor (244) en la (241):

$$\frac{dE'_{1d}}{dt} = \frac{dE_{1d}}{dt} - \frac{X_{11qq} (X_{11dq} - X'_{11dq})}{R_{11}^2 + X_{11dq} X_{11qq}} \frac{dE_{1d}}{dt} \quad (245)$$

y simplificando:

$$\frac{dE'_{1d}}{dt} = \frac{R_{11}^2 + X'_{11dq} X_{11qq}}{R_{11}^2 + X_{11dq} X_{11qq}} \frac{dE_{1d}}{dt} \quad (246)$$

Substituyendo este valor (246) en la (226), se tiene:

$$E_{1d} + \frac{R_{11}^2 + X'_{11dq} X_{11qq}}{R_{11} + X_{11dq} X_{11qq}} T_{1d0} \frac{dE_{1d}}{dt} = v_1 \quad (247)$$

Haciendo:

$$T_{1d} = \frac{R_{11}^2 + X'_{11dq} X_{11qq}}{R_{11} + X_{11dq} X_{11qq}} T_{1d0} \quad (248)$$

la (247) se convierte en:

$$E_{1d} + T_{1d} \frac{dE_{1d}}{dt} = v_1 \quad (249)$$

la que comparada con la (230), e integrada, se obtendrá una ecuación de la forma (231), pero cuya



constante de decrecimiento será  $T_{1d}$ ; luego, esta constante viene determinada por (248).

Para el caso ideal de dos máquinas, 1 y 2, con tensión constante en una de ellas y sin derivaciones intermedias; o lo que es lo mismo, para una máquina 1, conectada a una fuente de tensión constante  $E_2$  mediante una resistencia óhmica  $R_2$  y una reactancia  $X_2$ , se tiene:

$$T_{1d} = \frac{R^2 + X'_d X_q}{R^2 + X_d X} T_{ido} \quad (250)$$

y si además se desprecian las resistencias óhmicas, esta fórmula queda simplificada a

$$T_{1d} = \frac{X'_d}{X_d} T_{ido} \quad (251)$$

### c) Caso real de dos máquinas.

Para que el caso considerado anteriormente (b) fuera el real de dos máquinas, 1 y 2, le falta tener en cuenta la variabilidad de  $E_2$ . Consideremos ahora esta variabilidad, y a fin de eliminar las derivaciones intermedias, substituyamos igualmente la máquina 2 por la ficticia 2f, resultando las mismas fórmulas (234) y (236) y el mismo diagrama de funcionamiento (figura 53), pero con  $E_{2Q}$  y  $E_{2fQ}$  variables.

En este caso tendremos las 8 variables siguientes:  $E_{1d}$ ,  $E'_{1d}$ ,  $E_{1Q}$ ,  $E_{2fd}$ ,  $E'_{2fd}$ ,  $E_{2fQ}$ , y la corriente entre las dos máquinas que tienen dos grados de libertad. Las ecuaciones que las relacionan son las siguientes:

1.º El polígono OABCD (fig. 53), debe ser cerrado, y esta condición se traduce en dos ecuaciones, proyectándolo sobre los ejes cualesquiera. Escogiendo como tales los

$$OY_{1d} \quad \text{y} \quad OY_{1q}$$

se tiene las ecuaciones:

$$E_{1Q} = E_{2fQ} \cos \delta_s + R_{11} I_{1q} + X_{11qq} I_{1d} \quad (252)$$

$$E_{2fQ} \sin \delta_s + R_{11} I_{1d} = X_{11qq} I_{1q} \quad (253)$$

Si en lugar de escoger estos ejes tomásemos los  $OY_{2fd}$  y  $OY_{2fq}$  y designamos por  $I_{2fd}$  e  $I_{2fq}$  la corriente en fase y en cuadratura que da la máquina 2f, en lugar de las ecuaciones (252) y (253), tendríamos análogamente las dos siguientes:

$$E_{2fQ} = E_{1Q} \cos \delta_s + R_{11} I_{2fq} + X_{11qq} I_{2fd} \quad (254)$$

$$E_{1Q} \sin \delta_s + R_{11} I_{2fd} = X_{11qq} I_{2fq} \quad (255)$$

2.º Las variables  $E_{1d}$ ,  $E'_{1d}$ ,  $E_{1Q}$  están relacionadas

mediante dos de las ecuaciones (140), (141) y (142); y teniendo en cuenta que

$$X_{11dq} - X'_{11dq} = x_{1d} - x'_{1d}$$

$$X_{11dq} - X_{11qq} = x_{1d} - x_{1q}$$

resulta:

$$E_{1d} = E'_{1d} + (X_{11dq} - X'_{11dq}) I_{1d} \quad (256)$$

$$E_{1d} = E_{1Q} + (X_{11dq} - X_{11qq}) I_{1d} \quad (257)$$

3.º Las variables  $E_{2fd}$ ,  $E'_{2fd}$  y  $E_{2fQ}$  están también ligadas por dos de las ecuaciones (137), (138) y (139), que aplicadas a la máquina ficticia 2f, se obtiene:

$$E_{2fd} = E'_{2fd} + (x'_{2fd} - x_{2fd}) I_{2fd} \quad (258)$$

$$E_{2fd} = E_{2fQ} + (x_{2fd} - x_{2fq}) I_{2fd} \quad (259)$$

Luego, las 8 variables están ligadas por las 6 ecuaciones (252, 253, 256, 257, 258 y 259), o bien por las (254, 255, 256, 257, 258 y 259).

Eliminando  $E_{1Q}$  entre las (252) y (257) y  $E_{2fQ}$  análogamente entre las (254) y (259), se obtiene:

$$E_{1d} = E_{2fQ} \cos \delta_s + R_{11} I_{1q} + X_{11dq} I_{1d} \quad (260)$$

$$E_{2fd} = E_{1Q} \cos \delta_s + R_{11} I_{2fq} + (X_{11qq} + x_{2fd} - x_{2fq}) I_{2fd} \quad (261)$$

Eliminando  $I_{1q}$  entre las (253) y (260), e  $I_{2fq}$ , análogamente entre las (255) y (261), se encuentra:

$$I_{1d} = \frac{X_{11qq} E_{1d} - (R_{11} \sin \delta_s + X_{11qq} \cos \delta_s) E_{2fQ}}{R_{11}^2 + X_{11dq} X_{11qq}} \quad (262)$$

$$I_{2fd} = \frac{X_{11qq} E_{2fd} - (R_{11} \sin \delta_s + X_{11qq} \cos \delta_s) E_{1Q}}{R_{11}^2 + (X_{11qq} + x_{2fd} - x_{2fq}) X_{11qq}} \quad (263)$$

Substituiremos la (262) en las (265) y (257) y la (263) en las (258) y (259) e introduciremos los factores siguientes a fin de simplificar:

$$\frac{R_{11}^2 + X_{11dq} X_{11qq}}{R_{11}^2 + X_{11dq} X_{11qq}} = K_{1d} \quad (264)$$

$$\frac{R_{11}^2 + X_{11qq}^2}{R_{11}^2 + X_{11dq} X_{11qq}} = K_{1q} \quad (265)$$

$$\frac{R_{11}^2 + (X_{11qq} + x_{2fd} - x_{2fq}) X_{11qq}}{R_{11}^2 + (X_{11qq} + x_{2fd} - x_{2fq}) X_{11qq}} = K_{2d} \quad (266)$$

$$\frac{R_{11}^2 + X_{11qq}^2}{R_{11}^2 + (X_{11qq} + x_{2fd} - x_{2fq}) X_{11qq}} = K_{2q} \quad (267)$$

y tendremos:

$$E'_{1d} = K_{1d} E_{1d} + (1 - K_{1d}) \left( \frac{R_{11}}{X_{11qq}} \sin \delta_s + \cos \delta_s \right) E_{2fQ} \quad (268)$$

$$E_{1Q} = K_{1q} E_{1d} + (1 - K_{1q}) \left( \frac{R_{11}}{X_{11qq}} \sin \delta_s + \cos \delta_s \right) E_{2fQ} \quad (269)$$



$$E'_{2fd} = K_{2d} E_{2fd} + (1 - K_{2d}) \left( \frac{R_{11}}{X_{11qg}} \sin \delta_s + \cos \delta_s \right) E_{1Q} \quad (270)$$

$$E_{2fQ} = K_{2q} E_{2fd} + (1 - K_{2q}) \left( \frac{R_{11}}{X_{11qg}} \sin \delta_s + \cos \delta_s \right) E_{1Q} \quad (271)$$

Así, el sistema primitivo de 6 ecuaciones y 8 variables queda reducido al de 4 ecuaciones y 6 variables formado por las (268, 269, 270, 271).

Eliminando  $E_{1Q}$  entre las (270) y (271):

$$E_{2fQ} = \frac{K_{2q} - K_{2d}}{1 - K_{2d}} E_{2fd} + \frac{1 - K_{2q}}{1 - K_{2d}} E'_{2fd} \quad (272)$$

Substituyendo este valor (272) en las (268), tendremos:

$$E'_{1d} = K_{1d} E_{1d} + (1 - K_{1d}) \left( \frac{R_{11}}{X_{11qg}} \sin \delta_s + \cos \delta_s \right) \left( \frac{K_{2q} - K_{2d}}{1 - K_{2d}} E_{2fd} + \frac{1 - K_{2q}}{1 - K_{2d}} E'_{2fd} \right) \quad (273)$$

Esta ecuación relaciona las 4 variables  $E'_{1d}$ ,  $E_{1d}$ ,  $E_{2fd}$  y  $E'_{2fd}$ . Eliminando de una manera análoga  $E_{2fQ}$  entre las ecuaciones (268) y (269) y el valor resultante de  $E_{1Q}$  substituyéndolo en la (270), hallaríamos:

$$E'_{2fd} = K_{2f} E_{2fd} + (1 - K_{2d}) \left( \frac{R_{11}}{X_{11qg}} \sin \delta_s + \cos \delta_s \right) \left( \frac{K_{1q} - K_{1d}}{1 - K_{1d}} E_{1d} + \frac{1 - K_{1q}}{1 - K_{1d}} E'_{1d} \right) \quad (274)$$

Las ecuaciones (273) y (274) forman el sistema de dos ecuaciones con cuatro variables a que queda reducido el sistema primitivo.

La ecuación (225) aplicada a las máquinas 1 y 2 nos daría dos ecuaciones diferenciales que, unidas a las (272) y (273), formarían cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas, entre las que teóricamente podríamos despejar  $E_{1d}$  y  $E_{2fd}$ ; pero ya se puede comprender las dificultades matemáticas con que se tropieza al intentarlo.

Como puede verse, el problema es muy complicado. Resulta que el decrecimiento de una máquina está relacionado con el de la otra, y con el desplazamiento angular  $\delta_s$ .

Para que pueda admitirse una constante de decrecimiento, es preciso que éste sea de forma exponencial, lo que exige que la ecuación diferencial resultante sea lineal y con coeficientes constantes; y para

que esto tenga lugar es preciso que exista proporcionalidad entre  $E_{1d}$  y  $E'_{1d}$ .

Si las dos máquinas representan dos centrales algo distantes, la reactancia de la línea o líneas que las interconecta será una parte importante de los valores de  $X$ ; y siendo esta reactancia constante, el valor de  $K_{1d}$  será poco distinto de la unidad. Entonces, la solución práctica consiste en tolerar el error que se comete al suponer  $1 - K_{1d} = 0$ , con lo que se anula el segundo término de la (273), quedando ésta reducida a:

$$E'_{1d} = K_{1d} E_{1d} \quad (275)$$

Substituyendo ésta (275) en la (226), se encuentra:

$$E_{1d} + K_{1d} T_{1d} \frac{dE_{1d}}{dt} = v_1 \quad (276)$$

que comparándola con la (230) e integrándola, se obtendrá una ecuación de la forma (231), cuya constante de decrecimiento sería:

$$T_{1d} = K_{1d} T_{1d0} \quad (277)$$

y teniendo en cuenta la (263), resulta:

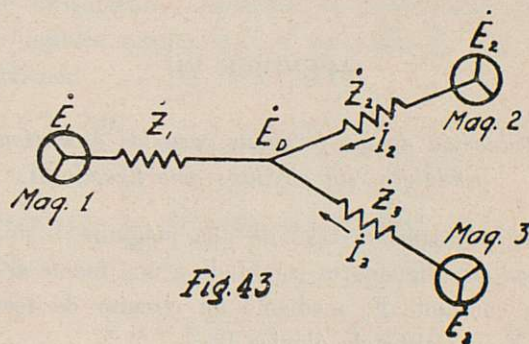
$$T_{1d} = \frac{R_{11}^2 + X'_{11dq} X_{11qg}}{R_{11}^2 + X_{11dq} X_{11qg}} \quad (278)$$

el mismo valor que para el caso anterior (b).

#### d) Caso general de varias máquinas.

Este caso debe reducirse al de dos máquinas (c), considerado anteriormente, para lo cual se substituyen todas las máquinas, menos la que se está estudiando, por otra máquina ficticia 2f y se aplica la fórmula práctica (278).

En el Apéndice II hemos expuesto un método para substituir dos máquinas por otra ficticia equivalente.





Así, considerando el caso de tres máquinas (fig. 43 del Apéndice IV, aquí reproducido), aplicando este método lo reduciríamos al de dos máquinas (fig. 44 del Apéndice IV, aquí reproducido), cumpliéndose las fórmulas (132) y (133).

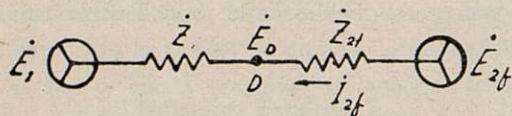


Fig. 44

Al acoplar las dos impedancias  $\dot{Z}_1$  y  $\dot{Z}_{2f}$  en una, tendremos el caso de la figura 52, en la que

$$\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}_2 \dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} \quad (279)$$

Esta fórmula (279) nos dice que  $\dot{Z}_{11}$  es la impedancia indiferente de la máquina 1 (fig. 43), y es fácil comprender que se llegaría al mismo resultado considerando más de tres máquinas, aunque fuesen con derivaciones intermedias.

Así, la fórmula (278) admitida como solución práctica en el caso (c) también puede admitirse para este caso general, pudiendo escribir

$$T_d = \frac{R_{11}^2 + X'_{1dq} X_{1qq}}{R_{11}^2 + X_{1dq} X_{1qq}} \quad (280)$$

Si para simplificar despreciamos las resistencias óhmicas, esta fórmula (280) se convierte en:

$$T_d = \frac{X'_{1dq}}{X_{1dq}} T_{d0} \quad (281)$$

y teniendo en cuenta la (233), puede modificarse en:

$$T_d = \frac{X'_{1dq}}{X_{1dq}} \cdot \frac{x_d}{x'_d} T'_d \quad (282)$$

## APENDICE VII

### Deducción de las fórmulas para las oscilaciones pendulares sin circuitos amortiguadores

Consideremos el caso de una máquina 1 sin circuitos amortiguadores conectada a una fuente de tensión constante  $E_2$  mediante un circuito de reactancia  $X_2$  y resistencia óhmica  $R_2$

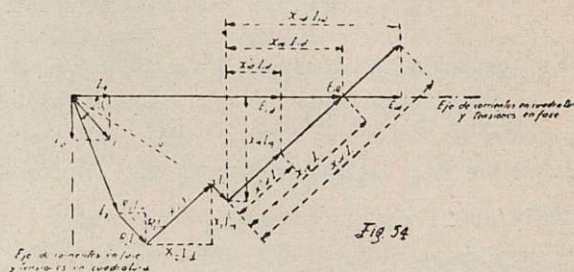
La ecuación general del circuito de excitación de esta máquina expresada con el sistema de unidades de tanto por uno, es la 226 del Apéndice VI. Al entrar el rotor de la máquina en oscilación, el desplazamiento angular  $\delta_s$  experimenta un incremento  $\Delta \delta_s$  que es función periódica del tiempo y la ecuación (226) aplicada en el instante que dicho incremento vale  $\Delta \delta_s$ , nos da:

$$E_{1d} + \Delta E_{1d} + T_{1d0} \frac{d(E'_{1d} + \Delta E'_{1d})}{dt} = V_1 \quad (283)$$

De las ecuaciones (226) y (283) se obtiene:

$$\Delta E_{1d} + T_{1d0} \frac{d\Delta E'_{1d}}{dt} = 0 \quad (284)$$

Para determinar  $\Delta E'_{1d}$ , bastará expresar  $\Delta E_{1d}$  en función de  $\Delta E'_{1d}$  y  $\Delta \delta_s$ ; para lo que nos serviremos



del diagrama de funcionamiento de la máquina (figura 54), del cual se deduce:

$$E_{1d} = E_2 \cos \delta_s + R_2 I_{1q} + X_2 I_{1d} + r_1 I_{1q} + x'_{1d} I_{1d} \quad (285)$$

$$E_{1d} = E'_{1d} + (x_{1d} - x'_{1d}) I_{1d} \quad (286)$$

$$E_2 \sin \delta_s + R_2 I_{1d} - X_2 I_{1q} + r_1 I_{1d} - x_{1q} I_{1q} = 0 \quad (287)$$

Teniendo en cuenta que:

$$r_1 + R_2 = R \quad (288)$$

$$x_{1q} + x_2 = X_q \quad (289)$$

$$x_{1d} + X_2 = X_d \quad (290)$$

$$x_{1d} + X_2 = X'_d \quad (291)$$

las ecuaciones (285), (286) y (287) quedan reducidas a

$$E'_{1d} = E_2 \cos \delta_s + R I_{1q} + X'_d I_{1d} \quad (292)$$

$$E_{1d} = E'_{1d} + (X_d - X'_d) I_{1d} \quad (293)$$

$$E_2 \sin \delta_s + R I_{1d} - X_q I_{1q} = 0 \quad (294)$$

Entre tres ecuaciones (292, 293 y 294) ligan las cinco variables  $E_{1d}$ ,  $E'_{1d}$ ,  $I_{1d}$ ,  $I_{1q}$ ,  $\delta_s$ ; eliminando



$I_{1d}$ , e  $I_{1q}$ , tendremos una ecuación que relacionará las otras tres; para lo cual entre las (292) y (294), se obtiene:

$$I_{1d} = \frac{1}{R^2 + X_d'X_q} (X_q E_{1d} - X_q E_2 \cos \delta_s - R E_2 \sin \delta_s) \quad (295)$$

Entre esta ecuación y la (293), se tiene:

$$E_{1d} = \frac{R^2 + X_d X_q}{R^2 + X_d' X_q} E_{1d}' - \frac{X_d - X_d'}{R^2 + X_d' X_q} E_2 (X_q \cos \delta_s + R \sin \delta_s) \quad (296)$$

Derivando esta ecuación (296) con respecto a  $\delta_s$ , hallaremos:

$$\frac{dE_{1d}}{d\delta_s} = \frac{R^2 + X_d X_q}{R^2 + X_d' X_q} \frac{dE_{1d}'}{d\delta_s} + \frac{X_d - X_d'}{R^2 + X_d' X_q} E_2 (X_q \sin \delta_s - R \cos \delta_s) \quad (297)$$

Admitiendo que los valores de  $\Delta \delta_s$  sean lo suficientemente pequeños para poderlos considerar como diferenciales, tendremos:

$$\Delta E_{1d} = \frac{dE_{1d}}{d\delta_s} \Delta \delta_s \quad (298)$$

$$\Delta E_{1d}' = \frac{dE_{1d}'}{d\delta_s} \Delta \delta_s \quad (299)$$

Multiplicando la (297) por  $\Delta \delta_s$ , teniendo en cuenta las (298) y (299), se halla:

$$\Delta E_{1d} = \frac{R^2 + X_d X_q}{R^2 + X_d' X_q} \Delta E_{1d}' + \frac{X_d - X_d'}{R^2 + X_d' X_q} E_2 (X_q \sin \delta_s - R \cos \delta_s) \Delta \delta_s \quad (300)$$

Substituyendo este valor (300) en la (284) y recordando la (250), se obtiene:

$$\Delta E_{1d}' + T_{1d} \frac{d\Delta E_{1d}'}{dt} = \frac{X_d - X_d'}{R^2 + X_d' X_q} E_2 (R \cos \delta_s - X_q \sin \delta_s) \quad (301)$$

Suponiendo que  $\Delta \delta_s$  varía según la función senoidal

$$\Delta \delta_s = \Delta \delta_{sm} \sin \frac{2\pi}{T_p} t \quad (302)$$

la (301) quedará convertida en la siguiente ecuación diferencial:

$$\Delta E_{1d}' + T_{1d} \frac{d\Delta E_{1d}'}{dt} = \frac{X_d - X_d'}{R^2 + X_d' X_q} E_2 (R \cos \delta_s - X_q \sin \delta_s) \Delta \delta_{sm} \sin \frac{2\pi}{T_p} t \quad (303)$$

El segundo miembro de esta ecuación es una función senoidal, y por ser ésta una ecuación lineal con coeficientes constantes, su integral será de la forma:

$$\Delta E_{1d}' = C e^{-\frac{t}{T_{1d}}} + \Delta E_{1dm}' \sin \left( \frac{2\pi}{T_p} t - \beta \right) \quad (304)$$

El primer término de ésta (304), por ser una función exponencial decreciente, se anula una vez haya transcurrido un tiempo suficiente quedando la integral (304) reducida al segundo término, esto es:

$$\Delta E_{1d}' = \Delta E_{1dm}' \sin \left( \frac{2\pi}{T_p} t - \beta \right) \quad (305)$$

Substituyendo esta integral (305) en la (303), se hallarán los valores de  $\Delta E_{1dm}'$  y  $\beta$  siguientes:

$$\Delta E_{1dm}' = \frac{E_2}{\sqrt{1 + \left( 2\pi \frac{T_{1d}}{T_p} \right)^2}} \times \frac{X_d - X_d'}{R^2 + X_d' X_q} (R \cos \delta_s - X_q \sin \delta_s) \Delta \delta_{sm} \quad (306)$$

$$\tan \beta = 2\pi \frac{T_{1d}}{T_p} \quad (307)$$

Pasemos a determinar el incremento de potencia  $\Delta P_1$  durante las oscilaciones; para lo cual, por tener en cuenta las resistencias óhmicas, nos valdremos de la fórmula (14) tomando la tensión interior detrás de la reactancia en cuadratura  $E_{1Q}$  y la reactancia  $x_{1Q}$  en cuadratura de la máquina, con lo que resulta una impedancia de sincronización igual a  $Z_q$ ; por no haber derivaciones intermedias la impedancia indiferente también resulta igual a este valor  $Z_q$ , con esto se obtiene:

$$P_1 = \frac{E_{1Q}^2}{Z_q} \sin \alpha_q + \frac{E_{1Q} E_2}{Z_q} \sin (\delta_s - \alpha_q) \quad (308)$$

Recordando las fórmulas (141), (289) y (291), se tiene:

$$E_{1d}' = E_{1Q} - (X_q - X_d') I_{1d} \quad (309)$$



Las ecuaciones (308), (309) y (295) forman un sistema de tres ecuaciones, en el que eliminando  $E_{1Q}$  e  $I_{1d}$ , hallaremos la función:

$$P_1 = F(E'_{1d}, \delta_s) \quad (310)$$

pero como de esta función sólo nos interesa su derivada parcial respecto a  $E'_{1d}$ , determinaremos ésta del modo siguiente por considerarlo más cómodo.

Derivando la (308) respecto a  $E_{1Q}$ , tendremos:

$$\frac{\partial P_1}{\partial E_{1Q}} = 2 \frac{E_{1Q}}{Z_q} \sin \alpha_q + \frac{E_2}{Z_q} \sin (\delta_s - \alpha_q) \quad (311)$$

y derivando la (309) y (295) respecto a  $E'_{1d}$ :

$$\frac{\partial E_{1Q}}{\partial E'_{1d}} = 1 + (X_q - X'_d) \frac{\partial I_{1d}}{\partial E'_{1d}} \quad (312)$$

$$\frac{\partial I_{1d}}{\partial E'_{1d}} = \frac{X_q}{R^2 + X'_d X_q} \quad (313)$$

Combinando estas dos ecuaciones (312) y (313), resulta:

$$\frac{\partial E_{1Q}}{\partial E'_{1d}} = \frac{R^2 + X_q^2}{R^2 + X'_d X_q} \quad (314)$$

Como se tiene:

$$\frac{\partial P_1}{\partial E'_{1d}} = \frac{\partial P_1}{\partial E_{1Q}} \frac{\partial E_{1Q}}{\partial E'_{1d}} \quad (315)$$

Substituyendo en ésta los valores (311) y (314), hallaremos.

$$\frac{\partial P_1}{\partial E'_{1d}} = \frac{R^2 + X_q^2}{R^2 + X'_d X_q} \left[ 2 \frac{E_{1Q}}{Z_q} \sin \alpha_q + \frac{E_2}{Z_q} \sin (\delta_s - \alpha_q) \right] \quad (316)$$

Como que  $\delta_s$  y  $\alpha_q$  están comprendidos entre 0 y 90°, siempre que  $\delta_s > \alpha_q$  el valor expresado por esta fórmula

(316) será positivo y en caso de que  $\delta_s < \alpha_q$  el término,

$$\frac{E_2}{Z_q} \sin (\delta_s - \alpha_q)$$

será negativo, y la (316) podría escribirse:

$$\frac{\partial P_1}{\partial E'_{1d}} = \frac{R^2 + X_q^2}{R^2 + X'_d X_q} \left[ 2 \frac{E_{1Q}}{Z_q} \sin \alpha_q - \frac{E_2}{Z_q} \sin (\alpha_q - \delta_s) \right] \quad (317)$$

y como que

$$\sin \alpha_q > \sin (\alpha_q - \delta_s) \quad (318)$$

y con las condiciones prácticas de funcionamiento de la máquinas se tiene:

$$E_{1Q} > E_2 \quad (319)$$

resulta que

$$2 \frac{E_{1Q}}{Z_q} \sin \alpha_q > \frac{E_2}{Z_q} \sin (\alpha_q - \delta_s) \quad (320)$$

y el valor indicado por la (317) resulta también positivo.

Para determinar el valor de la energía absorbida de la masa giratoria en una oscilación, basta recordar cuanto se ha indicado en el apartado (B — g) referente al área que encierra el ciclo elíptico de las figuras 23 ó 24 aquí reproducidas. Este ciclo elíptico tiene por abscisas los valores de  $\Delta \delta_s$  y por ordenadas los de

$$\frac{\partial P_1}{\partial \delta_s} \Delta \delta_s + \frac{\partial P_1}{\partial E'_{1d}} \Delta E'_{1d} \quad (321)$$

y por lo tanto, su área vendrá expresada por la integral

$$W = \int_0^{T_p} \left( \frac{\partial P_1}{\partial \delta_s} \Delta \delta_s + \frac{\partial P_1}{\partial E'_{1d}} \Delta E'_{1d} \right) d\Delta \delta_s \quad (322)$$

Como los valores del término

$$\frac{\partial P_1}{\partial \delta_s} \Delta \delta_s$$

de la expresión dentro del signo integral no siguen ningún ciclo cerrado su integral resulta nula, y la (322) queda reducida a

$$W = \frac{\partial P_1}{\partial E'_{1d}} \int_0^{T_p} \Delta E'_{1d} d\Delta \delta_s \quad (323)$$

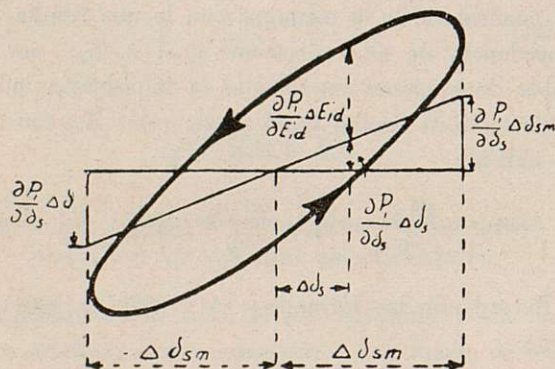


Fig. 23



Recordando las (302) y (305), tendremos:

$$W = \frac{\partial P_1}{\partial E'_{1d}} \int_0^{T_p} \Delta E'_{1dm} \sin \left( \frac{2\pi}{T_p} t - \beta \right) \frac{2\pi}{T_p} \Delta \delta_{sm} \cos \frac{2\pi}{T_p} t \times \\ \times dt = \frac{2\pi}{T_p} \times \\ \times \Delta \delta_{sm} \Delta E'_{1dm} \frac{\partial P_1}{\partial E'_{1d}} \int_0^{T_p} \sin \left( \frac{2\pi}{T_p} t - \beta \right) \cos \frac{2\pi}{T_p} t dt \quad (324)$$

Resolviendo la integral que figura en esta fórmula (324), mediante las transformaciones trigonométricas necesarias, se encuentra:

$$\int_0^{T_p} \sin \left( \frac{2\pi}{T_p} t - \beta \right) \cos \frac{2\pi}{T_p} t dt = \\ = \cos \beta \int_0^{T_p} \sin \frac{2\pi}{T_p} t \cos \frac{2\pi}{T_p} t dt - \sin \beta \int_0^{T_p} \cos^2 \frac{2\pi}{T_p} t dt = \\ = \frac{\cos \beta}{2} \int_0^{T_p} \sin \frac{4\pi}{T_p} t dt - \frac{\sin \beta}{2} \int_0^{T_p} \left( 1 + \cos \frac{4\pi}{T_p} t \right) dt = \\ = -\frac{1}{2} T_p \sin \beta \quad (325)$$

Substituyendo en la (324) el valor de esta integral y el de la fórmula (306), resulta:

$$W = \pi \frac{\partial P_1}{\partial E'_{1d}} \sin \beta \frac{E_2}{\sqrt{1 + \left( 2\pi \frac{T_{1d}}{T_p} \right)^2}} \times \\ \times \frac{X_d - X'_d}{R^2 + X_d X_q} (X_q \sin \delta_s - R \cos \delta_s) (\Delta \delta_{sm})^2 \quad (326)$$

Para que las oscilaciones sean amortiguadas, es necesario que en cada oscilación haya absorción de

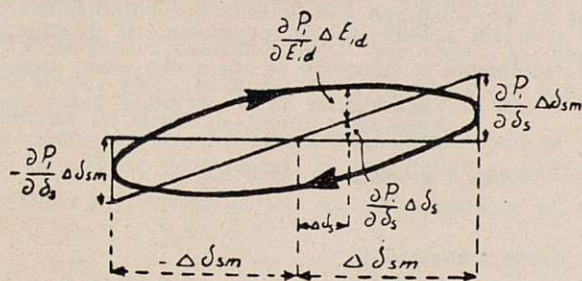


Fig. 24

energía de la masa giratoria; esto es, que  $W$  sea positivo, lo que tendrá lugar siempre que se cumpla la condición siguiente:

$$X_q \sin \delta_s - R \cos \delta_s > 0 \quad (327)$$

o bien

$$\operatorname{tg} \delta_s > \frac{R}{X_q} \quad (328)$$

## APÉNDICE VIII

### Comprobación experimental de la sincronización espontánea

#### a) Antecedentes.

En el laboratorio eléctrico de la Escuela de Peritos Industriales de Barcelona, el autor ha efectuado unas pruebas que, a pesar de su sencillez, son suficientes para comprobar experimentalmente la sincronización espontánea de las máquinas sincrónicas.

En estas pruebas se han utilizado dos alternadores trifásicos de las características siguientes:

25 KVA-220 voltios-66 amp.-1.000 r. p. m.-50 p/s.

10 KVA-250 voltios-23 amp.-1.500 r. p. m.-50 p/s.

Todas las pruebas efectuadas pueden agruparse en los tres ensayos siguientes:

*Ensayo número 1.*—Se ha utilizado el alternador de 25 KVA., sincronizado con la red de 220 V.

*Ensayo número 2.*—Comprende las pruebas realizadas con el alternador de 10 KVA., sincronizado con la red.

*Ensayo número 3.*—Comprende las pruebas con los dos alternadores sincronizados entre sí, separadamente de la red.

Con objeto de atenuar la corriente de la máquina durante la pérdida de sincronismo, se han intercalado en sus conexiones resistencias o impedancias.

Las pruebas se han llevado a cabo sincronizando la máquina y una vez tomada la carga que se deseaba, se ha provocado la pérdida de sincronismo, para lo cual se ha desconectado su interruptor, y se ha reconectado algunos segundos después. El modo de actuar la máquina ha sido distinto según el caso, observándose los cuatro tipos de comportamiento siguientes:

*Tipo 1.º* La máquinas se sincroniza por sí sola al reconectar su interruptor, aparentemente en el mismo instante de la reconexión, tomando la misma carga que llevaba al efectuar la desconexión.



*Tipo 2.º* La máquina se sincroniza por sí sola algunos segundos después de haberla reconectado, tomando también la misma carga de antes.

*Tipo 3.º* Una vez reconectada la máquina no se sincroniza; pero al disminuir poco a poco su velocidad se sincroniza espontáneamente, tomando una carga inferior a la que llevaba al efectuar la desconexión.

*Tipo 4.º* Una vez reconectada la máquina no se puede lograr su sincronización espontánea, aunque se regule la velocidad para igualarla a la de sincronismo. Estos casos han sido pocos, y antes de provocar la pérdida de sincronismo ya se observaba en todos ellos poca estabilidad por su marcada tendencia a oscilar, seguramente por demasiada resistencia intercalada en el circuito.

#### b) Ensayo número 1.

Ha sido efectuado con el alternador de 25 KVA, 220 V, 66 amp., 1.000 r. p. m. y 50 p/seg., conectado a la red de 220 V. a través de un regulador de inducción para poder tener distintas tensiones (figura 55). El motor de arrastre del alternador era tri-

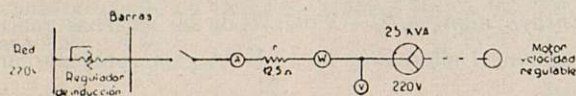


fig 55

fásico, de colector de velocidad variable y perfectamente regulable a mano. La resistencia  $r$  (fig. 55) para atenuar las corrientes de sincronización era de 12,5 ohmios y sólo en dos fases, ya que el alternador tenía el neutro aislado.

Se han hecho pruebas a las tensiones de 150, 180 y 210 voltios. Con las dos primeras tensiones no ha sido posible sincronizar la máquina con la red, pues siempre que se intentaba al entrar la máquina se formaban rápidamente oscilaciones de amplitud creciente que no era posible hacerlas desaparecer y obligaban a desconectarla. Esto es debido a que la resistencia óhmica del circuito es demasiado elevada.

A 210 voltios la máquina se ha sincronizado bien con la red, aunque una vez en paralelo acusaba poca estabilidad por su tendencia a oscilaciones, sobre todo

con cargas bajas. Las pruebas han consistido en las operaciones siguientes:

1.º Una vez la máquina en marcha a la velocidad de sincronismo aproximadamente, se ha excitado hasta tener en el voltímetro V (fig. 55) la tensión requerida y con el regulador de inducción se ha dado la misma tensión a las barras.

2.º Sincronizar.

3.º Tomar carga, que se medía con el vatímetro trifásico W (fig. 55).

4.º Desconectar la máquina.

5.º Esperar algunos segundos para que la máquina tenga tiempo de embalsarse debido a su descarga. Esto se podía observar muy bien con las oscilaciones de las lámparas del sincronoscopio.

6.º Reconectar el interruptor (sin tomar sincronismo) y observar si sincroniza espontáneamente. En caso de no hacerlo, regular la velocidad a mano para lograrlo.

Haciendo estas pruebas a 210 V. y a distintas cargas, se ha observado que:

1.º Siempre que la carga era inferior a 12,5 kilovatios, al reconectar la máquina se sincronizaba espontáneamente en un tiempo aparentemente instantáneo, tomando la misma carga que llevaba antes de la desconexión sin necesidad de accionar el motor de arrastre.

2.º Cuando la carga era superior a 12,5 kilovatios, al reconectar la máquina quedaba fuera de sincronismo y continuaba su marcha asincrónica sin señales de sincronización. Al disminuir lentamente la velocidad se observaba cómo disminuían las oscilaciones de la corriente hasta que se sincronizaba espontáneamente, en cuyo momento tomaba la carga de 12,5 Kw.

#### c) Ensayo número 2.

Ha sido efectuado con el alternador de 10 KVA., 250 voltios, 23 amp., 1.500 r. p. m. y 50 p/seg., conectado a la red a través del regulador de inducción y una resistencia de 12,5 ohmios en dos fases. El motor de arrastre era de corriente continua con excitación *compound* y con reóstato de regulación de velocidad (fig. 56).

Las pruebas se han efectuado en la misma for-



ma y operaciones que en el ensayo número 1. En la mayoría de veces no era posible sincronizar la máquina por formarse oscilaciones de amplitud creciente en el momento de tomar el paralelo con la red (resis-

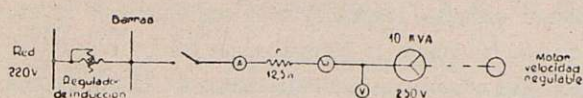


fig 56

tencia óhmica demasiado elevada), pudiendo efectuar solamente las dos pruebas siguientes:

**Primera prueba.**—Se toma paralelo con la red a 180 voltios, tomando 1 Kw. de carga, después se desconecta la máquina, y se la reconecta luego al cabo de algunos segundos. Se observa cómo la máquina queda fuera de sincronismo y que, sin regular la velocidad del motor de arrastre, queda sincronizada espontáneamente a los cinco segundos de su reconexión, tomando la misma carga de 1 Kw.

**Segunda prueba.**—Se toma el paralelo a 220 voltios y 1,5 Kw. de carga. Una vez provocada la pérdida de sincronismo, por la desconexión y reconexión, se observa la sincronización espontánea, sin necesidad de regular la velocidad, al cabo de unos dos segundos, tomando la misma carga de 1,5 Kw.

Como la máquina utilizada en este ensayo es precisamente una conmutatriz, está equipada con un autotransformador conectado en V que reduce la tensión al 40 por 100, con objeto de su arranque por lado de alterna en forma de motor asincrónico.

Con objeto de aumentar la estabilidad, se utilizó el citado autotransformador como impedancia en dos

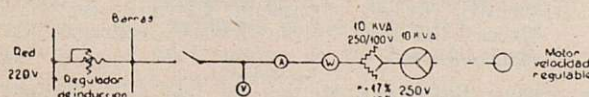


fig 57

fases substituyendo a las resistencias  $r$ , repitiendo así las pruebas con el esquema de la figura 57. Los resultados obtenidos son como sigue:

#### Carga antes pérdida de sincronismo.

Voltios en barras...	150	150	180	180	210	210	250	250	250
Idem en alternador.	60	60	72	72	84	84	100	100	100
Kilovatios.....	1	1,5	1,3	1,8	1	2,2	1,5	2	2,8

#### Oscilaciones durante pérdida de sincronismo.

Amperios máximos (aproximadamente).....	15	18	19	22	20	30	30	35	40
---	----	----	----	----	----	----	----	----	----

#### Sincronización espontánea.

Sincroniza espontáneamente sin ninguna maniobra (en segundos) tomando la misma carga de antes de la pérdida.....	4 NO	3 NO	2	4	1/2	1/2	4
--	------	------	---	---	-----	-----	---

Es preciso regular velocidad alterna para sincronizar espontáneamente, tomando la carga de (Kw.).....	—	1	—	1,3	—	—	—	—
---	---	---	---	-----	---	---	---	---

Estos resultados indican que el alternador de 250 voltios, funcionando a 60 voltios, al perder el sincronismo, se sincroniza espontáneamente cuando el deslizamiento del rotor con respecto al campo giratorio del estator se haya reducido a un valor tal que al producirse la sincronización tome la carga de 1 Kw.

Al repetir las pruebas con tensiones mayores demuestran que la facilidad de sincronizarse espontáneamente aumenta con la tensión. Funcionando a 72 voltios, la sincronización ya se produce con un deslizamiento que corresponda tomar 1,3 Kw. Funcionando a 84 voltios, o más, no se han hecho las suficientes pruebas para ver a cuánto aumentaba la potencia máxima a que se podía sincronizar espontáneamente; según puede verse en el detalle anterior se sincronizó en todos los casos probados sin necesidad de regular a mano la velocidad.

#### d) Ensayo número 3.

Ha sido efectuado con las dos máquinas mencionadas funcionando en sincronismo entre sí separadamente de la red (fig. 58) y maniobrando análogamente como en los ensayos anteriores.

En las primeras pruebas se intentó atenuar las corrientes durante la pérdida de sincronismo intercalando una resistencia de 12,5 ohmios en dos fases; pero



en ningún caso fué posible tomar sincronismo por formarse oscilaciones crecientes en el momento de acoplar en paralelo (demasiada resistencia óhmica).

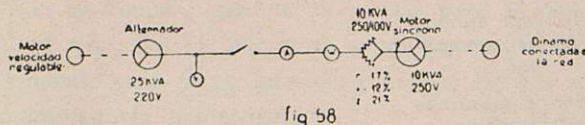


fig 58

En vista de esto, la atenuación de las corrientes se llevó a cabo acoplando las máquinas a través del auto-transformador en V (fig. 58). Los resultados obtenidos son los siguientes:

*Carga antes pérdida de sincronismo.*

Voltios alternador .....	200	200	220	250	250	250
Idem motor síncrono.....	80	80	88	100	100	100
Kilovatios .....	1,4	2	3	1	2	2,5

*Oscilaciones durante pérdida de sincronismo.*

Amperios máximos (aproximadamente).....	18	20	25	20	25	30
---	----	----	----	----	----	----

*Sincronización espontánea.*

Sincroniza espontáneamente sin ninguna maniobra (en segundos) tomando la misma carga de antes de la pérdida .....	8	NO	NO	1	5	NO
---	---	----	----	---	---	----

Es preciso regular velocidad alterna para sincronizar espontáneamente, tomando la carga de (Kw.).....	—	1,4	2	—	—	2,2
---	---	-----	---	---	---	-----

Estos resultados son completamente similares a los del ensayo número 2, y se deducen de ellos las mismas consecuencias. Estableciendo una comparación entre ambos resultados, se observa que la máquina de 10 KVA. alcanza la sincronización espontánea más fácilmente estando acoplada a la red que con la otra máquina. Haciendo la comparación con el ensayo número 1, se observa que el alternador de 25 KVA. también logra la sincronización espontánea más fácilmente cuando está acoplado a la red.

Estas comparaciones parecen indicar que la máquina de capacidad prácticamente infinita y con velocidad constante que representa la red arrastra a la máquina que se ensaya más fácilmente que en el caso de dos máquinas similares con velocidades flexibles.

e) *Conclusión de las pruebas.*

A pesar de su sencillez, estos ensayos son suficientes para comprobar experimentalmente la siguiente conclusión:

Cuando una máquina pierde el sincronismo, una vez el deslizamiento del rotor respecto al campo giratorio del estator se haya reducido por debajo de un cierto valor, este campo giratorio arrastra al rotor y, después de algunas oscilaciones pendulares del mismo, la máquina queda completamente sincronizada en forma espontánea.

LISTA BIBLIOGRAFICA

1. «EINFÜHRUNG IN DIE THEORIE DER SELBSTERRECTEN SCHWINGEN SYNCHRONER MASCHINEN», por L. DREYFUS.—ELEKTROTECH MASCHINENBAN, 23 abril de 1911.
2. «EXPERIMENTAL ANALYSIS OF STABILITY AND POWER LIMITATIONS», por R. D. EVANS y R. C. BERGVAL.—TRANSACTIONS A. I. E. E., vol. 43, 1924, págs. 39-58.
3. «AN INVESTIGATION OF TRANSMISSION SYSTEM POWER LIMITS», por C. A. NICKLE y F. L. LAWTON.—TRANSACTIONS A. I. E. E., vol. 45, 1926, págs. 1-21.
4. «PRACTICAL ASPECTS OF SYSTEM STABILITY», por ROY WILKINS.—TRANSACTIONS A. I. E. E., vol. 45, 1926, páginas 41-50.
5. «STUDIES OF TRANSMISSION STABILITY», por R. D. EVANS y C. F. WAGNER.—TRANSACTIONS A. I. E. E., vol. 45, 1926, págs. 51-80.
6. «POWER LIMITS TESTS ON SOUTHEASTERN POWER AND LIGHT COMPANY'S SYSTEM», por S. MURRAY JONES y R. TREAT.—TRANSACTIONS A. I. E. E., vol. 48, 1929, páginas 268-81.
7. «POWER LIMITS OF 220 KV. TRANSMISSION LINES», por A. A. KRONEBERG y M. M. FERRAN.—ELECTRICAL ENGINEERING, noviembre 1933, págs. 758-66.
8. «INDUCTIVE NEUTRAL GROUNDING DEVICES», por A. U. WELCH.—GENERAL ELECTRIC REVIEW, septiembre 1934, páginas 398-406.
9. «SERIES RESISTENCE METHOD OF INCREASING TRANSIENT STABILITY LIMIT», por R. C. BERGVAL.—TRANSACTIONS A. I. E. E., vol. 50, 1921, págs. 490-4.
10. «STATIC STABILITY LIMITS AND THE INTERMEDIATE CONDENSER STATION», por C. F. WAGNER y R. D. EVANS.—TRANSACTIONS A. I. E. E., vol. 47, 1928, págs. 94-121.
11. «PROGRESS IN THE STUDY OF SYSTEM STABILITY», por I. H. SUMMERS y J. H. MC. CLURE.—TRANSACTIONS A. I. E. E., volumen 49, 1930, págs. 132-58.



12. «POWER LIMITS OF SYNCHRONOUS MACHINES», por E. CLARKE y R. G. LORRAINE.—ELECTRICAL ENGINEERING, noviembre 1933, págs. 780-7.
13. STEADY STATE STABILITY OF COMPOSITE SYSTEMS», por S. B. CRARY.—ELECTRICAL ENGINEERING, noviembre 1933, páginas 787-92.
14. «SYSTEM STABILITY AS DESIGN PROBLEM», por R. H. PARK y E. H. BANCKER.—TRANSACTIONS A. I. E. E., vol. 48, 1929, págs. 170-93.
15. «THE REACTANCES OF SYNCHRONOUS MACHINES», por R. H. PARK y B. L. ROBERTSON.—TRANSACTIONS A. I. E. E., volumen 47, 1928, págs. 514-35.
16. «METHOD OF SYMMETRICAL COORDINATES APPLIED TO THE SOLUTION OF POLYPHASE NETWORKS», por C. L. FORTESCUE.—TRANSACTIONS A. I. E. E., vol. 37, 1918, páginas 1027-1141.
17. «CALCULATION OF SINGLE-PHASE SHORT CIRCUITS BY THE METHOD OF SYMMETRICAL COMPONENTS», por A. P. MACKERRAS.—GENERAL ELECTRIC REVIEW, abril y julio, 1926, páginas 218-31 y 468-81.
18. «EL MÉTODO DE COMPONENTES SIMÉTRICAS Y SU APLICACIÓN AL CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS MONOFÁSICOS EN SISTEMAS TRIFÁSICOS», por J. INGLÉS COMAS.—REVISTA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL, octubre, 1933, págs. 321-7.
19. «SYMMETRICAL COMPONENTS AS APPLIED TO THE ANALYSIS OF UNBALANCED ELECTRICAL CIRCUITS», por C. F. WAGNER y R. D. EVANS.—Editorial Mc. Graw-Hill Book Co., New York.
20. «CURSO DE ELECTROTECNIA», por J. MORILLO FARFÁN (tomo II).—Editorial Nuevas Gráficas, Madrid.
21. «TRANSIENT TORQUE-ANGLE CHARACTERISTICS OF SYNCHRONOUS MACHINES», por W. V. LYON y H. E. EDGERTON.—TRANSACTIONS A. I. E. E., vol. 49, 1930, págs. 686-98.
22. «A CONTINUOUS INTEGRAPH», por V. BUSH, F. D. GAGE y H. R. STEWART.—FRANKLIN INSTITUTE JOURNAL, enero, 1927, págs. 63-84.
23. «INTEGRAPH SOLUTION OF DIFFERENTIAL EQUATIONS», por V. BUSH y H. C. HAZEN.—FRANKLIN INSTITUTE JOURNAL, noviembre, 1927, págs. 575-515.
24. «THE CALCULATION OF ALTERNATOR SWING CURVES», por F. R. LONGLEY.—TRANSACTIONS A. I. E. E., vol. 49, 1930, páginas 1129-50.
25. «EFFECT OF ARMATURE RESISTANCE UPON HUNTING OF SYNCHRONOUS MACHINES», por C. F. WAGNER.—TRANSACTIONS A. I. E. E., vol. 49, 1930, págs. 1011-24.
26. «HUNTING CHARACTERISTIC OF SYNCHRONOUS MACHINES FOR OSCILLATIONS OF SMALL AMPLITUDE», por J. WENNERBERG.—A. S. E. A. JOURNAL, abril-mayo, 1929.
27. «STABILITY OF SYNCHRONOUS MACHINES, EFFECT OF ARMATURE CIRCUIT RESISTANCE», por C. A. NICKLE y C. A. PIERCE.—TRANSACTIONS A. I. E. E., vol. 49, 1930, páginas 338-50.
28. «THE M. I. T. NETWORK ANALYZER, DESIGN AND APPLICATION TO POWER SYSTEM PROBLEMS», por H. C. HAZEN, O. R. SHURING y M. F. GARDNER.—TRANSACTIONS A. I. E. E., vol. 49, 1930, págs. 1102-13.
29. «CONFÉRENCE INTERNATIONALE DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES A HAUTE TENSION», 1935, Discusión del capítulo 110.

## PRINCIPALES SÍMBOLOS QUE SE EMPLEAN

$e_1, e_2, e_3 \dots$	tensiones interiores de las máq. 1, 2 ó 3 en valores instantáneos.	$\Delta E_{1dn}, \Delta I_{Qn} \dots$	incrementos de $E_{1d}$ y $E_{1Q}$ en el instante $n$ .
$E_1, E_2, E_3 \dots$	tensiones interiores de las máq. 1, 2 ó 3 en valores eficaces.	$f \dots$	frecuencia de funcionamiento normal.
$E_d \dots$	tensión interior sincrónica en fase de una máquina.	$i \dots$	corriente de excitación de una máquina.
$E'_d \dots$	tensión interior transitoria en fase de una máquina.	$i_n, i_{n+1} \dots$	corriente de excitación de una máquina en los instantes $n$ y $n+1$ considerados como principio y final de la etapa $n(n+1)$ .
$E_Q \dots$	tensión interior detrás de la reactancia en cuadratura.	$i_1, i_2, i_3 \dots$	corrientes de las máq. 1, 2 ó 3 en valores instantáneos.
$E_{1d}, E_{2d}, E_{nd} \dots$	valores de $E_d$ para las máquinas 1, 2 ó $n$ .	$I_1, I_2, I_3 \dots$	corrientes de las máq. 1, 2 ó 3 en valores eficaces.
$E'_{1d}, E'_{2d}, E'_{nd} \dots$	valores de $E'_d$ para las máquinas 1, 2 ó $n$ .	$i_{11}, i_{12}, i_{13} \dots$	corrientes componentes de la máq. 1 en valores instantáneos (figs. 2, 3 y 4).
$E_{1Q}, E_{2Q}, E_{nQ} \dots$	valores de $E_Q$ para las máquinas 1, 2 ó $n$ .	$I_{11}, I_{12}, I_{13} \dots$	corrientes componentes de la máq. 1 en valores eficaces.
$\Delta E_{1d}, \Delta E'_{1d} \dots$	incremento de $E_{1d}$ o de $E'_{1d}$ cuando $\delta_s$ experimenta el incremento $\Delta\delta_s$ .	$I_d \dots$	componente en fase de la corriente del inducido de una máquina.
$\Delta E'_{1dm} \dots$	valor máximo de $\Delta E'_{1d}$ en las oscilaciones pendulares.	$I_Q \dots$	componentes en cuadratura de la corriente del inducido de una máquina.
$E'_{dn}, E'_d(n \times 1) \dots$	valor máximo de $E'_d$ en los instantes $n$ y $n+1$ .	$I_{1d}, I_{1Q} \dots$	valores $I_d$ e $I_Q$ correspondientes a la máquina 1.
$E_{dn}, E_d(n+1) \dots$	valor máximo de $E_d$ en los instantes $n$ y $n+1$ como finales de etapa.	$I_{d(n-1)n}, I_{dn(n+1)} \dots$	valores de $I_d$ durante las etapas $(n-1)n$ y $n(n+1)$ .
$E_{Qn}, E_Q(n+1) \dots$	valor máximo de $E_Q$ en los instantes $n$ y $n+1$ como finales de etapa.	$\Delta I_{dn} \dots$	incremento de $I_{dn}$ en el instante $n$ .
$\Delta E_{dn}, \Delta E_{Qn} \dots$	incrementos de $E_d$ y $E_Q$ en el instante $n$ .		
$E_{1dn}, E_{1Qn} \dots$	valores de $E_{dn}$ y $E_{Qn}$ para la máquina 1.		



$\Delta I_{dn}$ ... ..	valor del incremento $\Delta I_{dn}$ para la máquina 1.	T ... ..	con cualquier otro subíndice significa el par correspondiente a la potencia, cuya letra P está dotada de los mismos subíndices.
M ... ..	constante de inercia de una máquina.	v ... ..	tensión de excitación de una máquina.
$M_1, M_2$ ... ..	constante de inercia de las máquinas 1 y 2.	$v_1$ ... ..	tensión de excitación de la máquina 1.
n ... ..	número de revoluciones por minuto de una máquina de funcionamiento normal.	$v_{n(n+1)}$ ... ..	valor de v durante la etapa $n(n+1)$ .
p ... ..	pares de polos de una máquina.	V ... ..	tensión en bornes de una máquina.
$P_1$ ... ..	valor instantáneo de la potencia de la máquina 1.	$x_d$ ... ..	reactancia sincrónica en fase de una máquina.
P ... ..	valor instantáneo de la potencia de la máquinas ideales 1 y 2.	$x'_d$ ... ..	reactancia transitoria en fase de una máquina.
$P_a, P_b, P_c$ ... ..	valores de P. variables según $\delta_s$ y para los casos A, B y C.	$x_q$ ... ..	reactancia en cuadratura de una máquina.
$P_{a0}, P_{a1}, P_{a2}$ ... ..	valores particulares de $P_a$ para $\delta_{s0}, \delta_{s1}$ y $\delta_{s2}$ .	$x_{1d}, x'_{1d}, x_{1q}$ ... ..	valores de $x_d, x'_d, x_q$ para la máquina 1.
$P_{b0}, P_{b1}, P_{b2}$ ... ..	valores particulares de $P_b$ para $\delta_{s0}, \delta_{s1}$ y $\delta_{s2}$ .	$X_{12}$ ... ..	reactancia correspondiente a la impedancia $Z_{12}$ .
$P_{c0}, P_{c1}, P_{c2}$ ... ..	valores particulares de $P_c$ para $\delta_{s0}, \delta_{s1}$ y $\delta_{s2}$ .	X ... ..	reactancia de sincronización entre dos máquinas ideales.
$P_A, P_B, P_C$ ... ..	valores máximos de P para los casos A, B y C.	$X_2$ ... ..	reactancia que conecta la máquina 1 a una fuente de tensión constante E.
$P_{max}$ ... ..	valor máximo de P para un caso general.	$X_A, X_B, X_C$ ... ..	valores de X para los casos A, B y C.
$P_n$ ... ..	potencia normal de plena carga de una máquina.	$X_K$ ... ..	reactancia que <i>shunta</i> el punto del defecto equivalente a los efectos del cortocircuito.
$P_m$ ... ..	potencia mecánica de una máquina.	$X_i$ ... ..	reactancia inversa en el punto del defecto.
$P_e$ ... ..	potencia eléctrica de una máquina.	$X_h$ ... ..	reactancia homopolar en el punto del defecto.
$P_1, P_2$ ... ..	potencia eléctrica de las máquinas 1 y 2.	$X_d, X'_d, X_q$ ... ..	valores de X tomando la reactancia sincrónica en fase, la transitoria en fase o la de cuadratura de la máquina 1 o reactancia de sincronización de una máquina conectada a una fuente de tensión constante $E_2$ y tomando la reactancia sincrónica en fase, la transitoria en fase o la de cuadratura.
$P_{(n-1)n}, P_{n(n+1)}$ ... ..	valores de $P_e$ durante las etapas $(n-1)n$ y $n(n+1)$ .	$X_{ii}$ ... ..	reactancia indiferente de una máquina.
Q ... ..	carga inicial en kilovatios.	$X_{iiqq}$ ... ..	valor de $X_{ii}$ tomando la reactancia en cuadratura.
R ... ..	resistencia correspondiente a la impedancia de sincronización entre dos máquinas ideales o resistencia de sincronización de una máquina conectada a una fuente de tensión constante $E_2$ .	$X_{iiddq}$ ... ..	valor de $X_{ii}$ tomando la reactancia sincrónica en fase de la máquina correspondiente y las de cuadratura para las demás máquinas.
$R_2$ ... ..	resistencia óhmica que conecta la máquina 1 a una fuente de tensión constante $E_2$ .	$X_{iiddq}$ ... ..	valor de $X_{ii}$ tomando la reactancia transitoria en fase de la máquina correspondiente y las de cuadratura para las demás máquinas.
$R_{11}$ ... ..	resistencia correspondiente a la impedancia $Z_{11}$ .	$X_{11}$ ... ..	de la máquina 1 para el caso de dos máquinas.
$R_{ii}$ ... ..	resistencia correspondiente a la impedancia, indiferente de una máquina.	$X_{11qq}, X_{11dq}, X'_{11dq}$ ... ..	valores de $X_{iiddq}, X_{iiddq}, X'_{iiddq}$ de la máquina 1 para el caso de dos máquinas.
$r_1$ ... ..	resistencia óhmica del inducido de la máquina 1.	$Z_{11}$ ... ..	impedancia indiferente de la máquina 1.
t ... ..	tiempo en segundos.	$Z_{12}, Z_{13}$ ... ..	impedancias de sincronización entre las máquinas 1-2 y 1-3.
$t_1$ ... ..	valor de t correspondiente a $\delta_{s1}$ .	$Z_q$ ... ..	impedancia de sincronización de una máquina conectada a una fuente de tensión constante $E_2$ y tomando la reactancia en cuadratura.
$T_e$ ... ..	par eléctrico en el rotor de una máquina.	$\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}$ ... ..	ángulos complementarios de $\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{13}$ .
$T_m$ ... ..	par mecánico en el rotor de una máquina.	$\beta$ ... ..	ángulo de defasaje en retraso de la función senoidal $\Delta E'_{1d}$ con respecto a la $\Delta \delta_s$ .
$T_r$ ... ..	par resultante actuando en el rotor de una máquina.	$\delta$ ... ..	desplazamiento angular eléctrico del rotor de una máquina con referencia a unos
$T_{d0}$ ... ..	constante de decrecimiento (en segundos) de la tensión en vacío de una máquina al desconectar la excitación.		
$T_d$ ... ..	constante de decrecimiento (en segundos) de la corriente transitoria de excitación de una máquina.		
$T'_d$ ... ..	constante de decrecimiento (en segundos) de la corriente transitoria de cortocircuito trifásico en bornes de una máquina.		
$T_{1d}, T'_{1d}, T_{1d0}$ ... ..	valores de $T_d, T'_d$ y $T_{d0}$ para la máquina 1.		
$T_p$ ... ..	período, en segundos, de las oscilaciones pendulares.		



	ejes que giran a la velocidad de funcionamiento normal.	$\Delta\delta_{sn}, \Delta\delta_{s(n+1)}$	incrementos de $\delta_s$ en los instantes $n$ y $n+1$ .
$\delta_1, \delta_2 \dots$	valores de $\delta$ para las máquinas 1 y 2.	$\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{13} \dots$	defasaje correspondiente a las impedancias $Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}$ .
$\delta_{12}, \delta_{13} \dots$	desplazamientos angulares eléctricos entre los rotores de las máquinas 1-2 y 1-3.	$\varphi_q \dots$	defasaje correspondiente a la impedancia $Z_q$ .
$\delta_s \dots$	desplazamiento angular eléctrico entre dos máquinas ideales.	$\omega \dots$	velocidad angular de una máquina medida en tanto por uno de la de funcionamiento normal.
$\Delta\delta_s \dots$	incremento de $\delta_s$ para un incremento $\Delta t$ del tiempo.	$\omega' \dots$	velocidad angular de una máquina en radianes por segundo.
$\Delta\delta_{sm} \dots$	valor máximo de $\Delta\delta_s$ en las oscilaciones pendulares.	$\omega'_n \dots$	valor de $\omega'$ correspondiente al funcionamiento normal.
$\delta_{s0}, \delta_{s1}, \delta_{s2} \dots$	valores particulares de $\delta_s$ .	$\omega_n \dots$	valor de $\omega$ en el instante $n$ .
$\delta_{(n-1)n},$ $\delta_{n(n+1)} \dots$	valores de $\delta$ durante las etapas $(n-1)n$ y $n(n+1)$ .	$\omega_{(n-1)n},$ $\omega_{n(n+1)} \dots$	valores de $\omega$ durante las etapas $(n-1)n$ y $n(n+1)$ .
$\delta_{s(n-1)n},$ $\delta_{sn(n+1)} \dots$	valores de $\delta_s$ durante las etapas $(n-1)n$ y $n(n+1)$ .	$W \dots$	energía absorbida de la masa giratoria de una máquina en una oscilación pendular.
$\Delta\delta_n, \Delta\delta_{n+1} \dots$	incrementos de $\delta$ en los instantes $n$ y $n+1$ .		

*Nota.*—Un punto encima del símbolo indica que es un vector.



[Faint, illegible text spanning the main body of the page, appearing to be a list or series of entries.]



## N.º 236.- Problemas que plantea en la producción y distribución de la energía eléctrica los embalses reguladores construídos, en construcción y en proyecto por el Estado español

Autor: D. RAMÓN MARÍA SERRET Y MIRETE

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

En el detallado estudio de la energía que son capaces de generar los saltos de pie de presa construídos, en construcción y en proyecto en toda España, así como la que el desembalse de los pantanos de cabecera de nuestros ríos producirá en los saltos, aguas abajo de los mismos, cuando su maquinaria sea la necesaria para utilizar íntegramente los caudales que la modulación para el riego imponga, se llega, en cifras redondas a 2.300 millones de kw.-h. año. Tal cifra ha sido encontrada detallando minuciosamente embalse por embalse y salto por salto, en el trabajo publicado por el Ministerio de Obras Públicas (Dirección General de Obras Hidráulicas, Servicios Eléctricos de Obras Públicas, año 1948), bajo el título «AVANCE DE EVALUACIÓN COMPARADA, DE POTENCIA Y ENERGÍA, PROCEDENTE DE LOS APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS DE ESPAÑA, EN RELACIÓN CON LA REGULACIÓN DEBIDA A EMBALSES Y SALTOS DE PIE DE PRESA, CONSTRUIDOS Y CONCEDIDOS POR EL ESTADO», com-

pletado posteriormente con lo referente a las cuencas del Júcar y del Turia.

El detalle con que están hechos los estudios citados nos revela de insistir sobre el mismo; únicamente interesa, para el trabajo que tenemos el honor de presentar a la consideración del Congreso, señalar que tal energía se generará entre las fechas 15 de mayo a 15 de septiembre (cuatro meses), transformando la época de más penuria de energía (estiaje) en una de normalidad.

Los estudios que figuran en el primero de los trabajos señala para el año 1956 un consumo probable de 10.636 millones de kw.-h. año, y admite, como primera aproximación, que en las épocas de estiaje (15 de mayo a 15 de septiembre) se genera la tercera parte de la energía total del año (hipótesis que realmente dará una energía por exceso), o sea,  $\frac{1}{3} \cdot 10.636 = 3.545$  millones de kw.-h. Trabajos de otros Ingenieros suponen que en el año 1956 la energía necesaria, realmente la generada, pues en la necesaria se in-



cluyen las pérdidas, alcanzará 11.580 millones de kilovatios-hora, lo cual significa para la época que consideramos,  $1/3 \cdot 11.580 = 3.866$  millones kw.-h.

Tal masa de energía podrá suministrarse en la parte que a continuación se indica, y se descompone en las siguientes partidas:

	10 <sup>6</sup> kw.-h.
Energía generada en el año 1943 (año hidráulicamente medio) por los saltos situados aguas abajo de los embalses de cabecera (trabajo primeramente citado y estudio del Júcar y Turia) ... ..	774
Idem íd. por los saltos no afectados por la regulación de los embalses de cabecera ... ..	377
Energía de futuros aprovechamientos no afectados por la regulación ... ..	100
Energía generada en los saltos de pie de presa y en los de agua fluente, aguas abajo de los embalses de cabecera, debido a la regulación ... ..	2.284
<b>TOTAL ... ..</b>	<b>3.535</b>

La cifra anterior coincide sensiblemente con la de la energía que consideramos necesaria, y difiere en menos, es decir, presenta un déficit de 331 millones de kw.-h. respecto de la admitida como necesaria por otros ingenieros. Sea una u otra cosa, la energía debida a la regulación por embalses de cabecera construídos por el Estado supone 2.284 millones de kw.-h. al año, generados en la época de estiaje, de manera completamente regular. Tal cifra representa el 65 % de la por nosotros considerada como necesaria en el período de estiaje, y el 59 % si se considera la cifra máxima de energía generada y que otros autores suponen.

Admitase uno u otro tanto por ciento, resulta que la energía debida a los embalses de cabecera construídos, en construcción y en proyecto por el Ministerio de Obras Públicas, supone más del 50 % de la energía que será precisa en el año 1959 en la época del cuatrimestre de estiaje (15 de mayo a 15 de septiembre).

Siendo así, precisa que se adopten conclusiones, que deben ser las primeras de las que figuren como propuestas al Gobierno para resolver el «PROBLEMA ELÉCTRICO EN ESPAÑA», como sigue:

1.ª «Conceder preferencia primordial, entre las construcciones hidroeléctricas, a los embalses de cabecera de nuestros principales ríos, así como a los saltos

de pie de presa de los mismos, y a la ampliación de aquellos aprovechamientos situados aguas abajo de los embalses reguladores. Para que lo anterior sea eficaz, deberán dichas construcciones tener preferencia absoluta en el suministro del cemento, acero y divisas, así como en el de los elementos necesarios para la vida de los trabajadores que tales obras precisen.»

2.ª «La rapidez en la construcción de los embalses de cabecera de nuestros principales ríos, con todas las obras a ellos anejas —desvío de caminos, expropiaciones, nuevos poblados y zonas de cultivo, etc.—, supone inversiones ingentes que el Presupuesto Nacional no puede aportar de manera normal y al ritmo necesario, y se precisa por ello el arbitrar fórmula financiera que salve tal dificultad; fórmula que puede consistir en levantar empréstito con la garantía del canon que suponen los 2.284 millones de kw.-h./año. Tal empréstito podrá ser del orden de 1.700 a 2.000 millones de pesetas.»

El detallado estudio de las cuencas del Júcar, del Turia y del Segura, en las que el riego tiene importancia vital, han conducido a las Confederaciones Hidrográficas del Júcar y del Segura a proponer una serie de embalses en los diferentes ríos de las cuencas que regentan, que prácticamente almacenarán, una vez construídos, toda el agua que hoy en su mayor parte se pierde en la época invernal, en el mar.

Lo anterior conducirá a que se invertirá el régimen de los ríos, transformándose en épocas de sequiaje las que en la actualidad son de aguas altas, y en de aguas altas las que actualmente son de estiaje. Esto sólo puede conseguirse cerrando las compuertas de los embalses en invierno y dando todo el caudal necesario para los riegos en verano. El hacerlo, supone:

- Disminuir en unos casos y anular en otros la energía que de manera irregular producen en la actualidad en época invernal diversos saltos.
- Aumentar y regularizar la que los mismos, y otros nuevos, de pie de presa, generarán en verano.

Cifras que pueden dar idea de la importancia del problema que se plantea, que, como se verá, tiene repercusiones en el resto de la economía eléctrica española, se estampan a continuación, extractadas de un informe de los Servicios Eléctricos de Obras Públicas, en relación con los aprovechamientos de



las cuencas del Júcar, del Turia y del Segura. Tales cifras son:

	Kw.
Potencia máxima con regulación en saltos existentes una vez ampliadas sus instalaciones para utilizar el caudal regulado ... ..	300.367
Potencia máxima con regulación en saltos de pie de presa y tramos intermedios ... ..	235.770
Potencia máxima con regulación en saltos futuros de empresas ... ..	52.630
<b>TOTAL POTENCIA EN LAS CUENCAS</b> ... ..	<b>588.767</b>

Potencia aproximada <i>posible</i> con regulación en los saltos existentes en 1943 ... ..	186.316
Potencia instalada en 1943 ... ..	227.405
Diferencia entre la potencia máxima total en las cuencas una vez efectuada la total regulación y la posible en el año (1943) = 588.767 — 186.316 = ...	402.451
Diferencia entre la potencia máxima total en las cuencas con regulación y la instalada en ella (1943) = 588.767 — 227.405 = ... ..	361.362

Las dos cifras últimamente estampadas, la primera el 216 % de la potencia máxima posible, y la segunda, el 159,5 % de la instalada en 1943, ponen claramente de manifiesto la importancia de la regulación que se alcanzará con los embalses en construcción y en proyecto y debidos al Ministerio de Obras Públicas.

Si de potencia pasamos a energía, los efectos de la regulación siguen teniendo gran importancia como se pone de manifiesto a continuación:

Es decir, que las obras de regulación suponen un

## Energía generada

R Í O S	Sin regular (año 1943) en 10 <sup>6</sup> kw.-h.	Regulada en 10 <sup>6</sup> kw.-h.
Júcar y Cabriel... ..	659,3	918,3
Turia ... ..	45,0	123,2
Mijares ... ..	110,6	178,3
Serpis ... ..	7,7	16,7
Segura y Mundo... ..	54,0	201,6
<b>TOTAL</b> ... ..	<b>876,6</b>	<b>1.438,1</b>

aumento de energía de 1.438,1 — 876,6 = 561,4 millones de kw.-h./año, o sea, el 64,5 % de la generada en año hidráulicamente medio; el tanto por ciento antes indicado pone claramente de manifiesto lo importante de la regulación.

Todas las cifras de energía anteriormente estampadas se han obtenido teniendo en cuenta una utilización de 3.600 horas/año. Por la utilización actual de los aprovechamientos de la Hidroeléctrica Española en el Júcar y en el Cabriel, vemos que sería posible, en la región levantina, una de 4.700 horas/año.

Las anteriores horas de utilización significan que la energía de posible generación, con la regulación, puede llegar a alcanzar la cifra de 1.887,6 millones de kilovatios-hora/año.

Si es interesante el estudiar los aumentos de energía que la regulación supone, lo es mucho más el estudiar, diferenciándola, la que corresponde a las épocas de invierno y de verano, cosa que se hace en el cuadro A adjunto para las 4.700 horas posibles y efectivas, hoy día, en esta zona de España.

## CUADRO A

CONCEPTO	Júcar y Cabriel	Turia	Segura	Totales
	S. E. de O. P.	S. E. de O. P.	S. E. de O. P.	S. E. de O. P.
<i>Producción anual</i>				
Actual (A) ... ..	+ 860,3	+ 53,8	+ 70,5	+ 989,6
Beneficio de energía ... ..	— 14,5	— 11,1	+ 6,8	— 18,8
Energía producida con la regulación ... ..	+ 941,0	+ 56,7	+ 77,3	+ 1.075,0
Energía producida con saltos de pie de presa... ..	+ 258,1	+ 104,2	+ 185,8	+ 548,1
Producción total futura con regulación ... ..	+ 1.199,1	+ 160,9	+ 263,1	+ 1.623,1
Aumento de energía sobre (A) ... ..	+ 338,8	+ 102,1	+ 192,6	+ 633,5
<i>Producción época de invierno</i>				
Diferencia en saltos actuales ... ..	— 212,4	— 12,0	— 0,0	— 224,4
En saltos de pie de presa y futuros de empresas.	+ 110,9	+ 45,1	+ 108,3	+ 264,3
Diferencia resultante ... ..	— 101,5	+ 33,1	+ 108,3	+ 39,9
<i>Producción época de verano</i>				
Aumento en saltos actuales ... ..	+ 197,9	+ 0,9	+ 6,8	+ 205,6
En saltos de pie de presa y futuros de empresas.	+ 242,4	+ 68,1	+ 77,5	+ 388,0
Diferencias resultantes ... ..	+ 440,3	+ 69,0	+ 84,3	+ 593,6



Por dicho cuadro A, se ve que, a través del año, se obtiene una compensación de energía entre las tres cuencas citadas, encontrando un superávit de energía de 633,5 millones de kw.-h./año, sobre la que pudo generarse en 1948 ( $989,6 \cdot 10^6$  kw.-h.), con las 4.700 horas/año de utilización.

Si, en lugar de estudiar el año conjunto, se estudian por separado las épocas de invierno y de verano, vemos que en la primera existe un déficit de energía de 224,4 millones de kw.-h., en los saltos actuales (1.943), con maquinaria ampliada, sobre la que pudiera producirse de no haberse proyectado la regula-

ción; y que existe un exceso de energía en igual época, debido a la regulación en los saltos de pie de presa, canales intermedios y saltos futuros de Empresas, de 264,3 millones de kw.-h., o sea, en total, en tal época del año (invierno) existe un pequeño exceso ( $264,3 - 224,4$ ) de 39,9 millones de kw.-h.

Es interesante estudiar cómo se integra el número anterior con los análogos de las tres cuencas. En la del Júcar y del Cabriel existe un déficit de 101,5 millones de kw.-h., que está compensado ampliamente por los excesos de 33,1 millones de kw.-h. en la del Turia, y 108,3 en la del Segura.

CUADRO B

	Júcar y Cabriel	Turia	Segura
	Millones de kw.-h.	Millones de kw.-h.	Millones de kw.-h.
<b>INVIERNO</b>			
Producción actual ... ..	501,2	31,7	108,6
<b>CON REGULACIÓN</b>			
Producción en saltos del Estado ... ..	80,9	41,6	18,9
Idem íd. futuros de empresas ... ..	30,0	3,5	12,6
Aumento por saltos del Estado y futuros de empresas.	110,9	45,1	31,5
Diferencia que precisa compensar en saltos actuales de empresas ... ..	- 212,4	- 12,0	- 0,0
Diferencia resultante en la cuenca ... ..	- 101,5	33,1	31,5
Producción de la cuenca con regulación ... ..	399,7	64,8	140,1
<b>VERANO</b>			
Producción actual ... ..	359,1	17,1	35,7
<b>CON REGULACIÓN</b>			
Producción en saltos del Estado ... ..	177,2	62,6	19,0
Idem íd. futuros de empresas ... ..	65,2	5,5	11,5
Aumento por saltos del Estado y futuros de empresas.	242,4	68,1	30,5
Diferencia que precisa compensar en saltos actuales de empresas. ... ..	197,9	0,9	26,4
Diferencia resultante en la cuenca ... ..	440,3	69,0	56,9
Producción en la cuenca con regulación ... ..	799,4	96,1	92,6
<b>ANUAL</b>			
Producción actual ... ..	860,3	58,8	144,3
<b>CON REGULACIÓN</b>			
Producción en saltos del Estado ... ..	258,1	104,2	37,9
Idem íd. futuros de empresas ... ..	95,2	9,0	24,1
Aumento por saltos del Estado y futuros de empresas.	353,3	113,2	62,0
Diferencia que precisa compensar en saltos actuales de empresas ... ..	- 14,5	- 11,1	26,4
Diferencia resultante en la cuenca ... ..	338,8	102,1	88,4
Producción en la cuenca con regulación ... ..	1.199,1	160,9	232,7



En época de verano, en las tres cuencas, existe importante exceso de energía que integra la cifra de 593,6 millones de kw.-h.

De lo anterior parece deducirse que, al compensarse las tres cuencas, en cuanto a energía se refiere, no existe problema alguno creado por la regulación estudiada, preferente en relación con los riegos, puesto que el déficit invernal que tal regulación acarrea en la cuenca Júcar-Cabriel se compensa con exceso, por la energía que se genera sobre la necesaria, en 1948, en la del Turia y, principalmente, en la del Segura. A más de tal compensación, se obtiene un superávit de energía en verano sobre la necesaria en 1948 del orden de los 640 millones de kw.-h.

Para el momento presente, el problema quedaría resuelto y la regulación cumpliría interesante papel, tanto en cuanto se refiere a riegos como en lo que afecta a energía, dejando disponible para el porvenir el importante bloque, antes citado, de 640 millones de kw.-h.

En el año 1958, admitido el crecimiento de que antes se habló, será necesario generar anualmente, para alimentar los mismos centros de consumo que hoy abastecen los aprovechamientos del Júcar-Cabriel, Turia y Segura,  $989,6 \cdot 2 = 1.979,2$  millones de kilovatios-hora/año, y como se obtendrá en tales cuencas 1.623,1, resulta un déficit de 356,1 millones de kilovatios-hora/año, que no puede ser compensado por ninguna cuenca de las estudiadas, pues es un déficit absoluto. Veamos cómo se reparte dicho déficit.

En invierno, actualmente, y con 4.700 h./año de utilización, las tres cuencas citadas en el párrafo anterior abastecen con 580,9 millones de kw.-h./año al mercado ( $501,2 + 31,7 + 48,0 = 580,9$ ), o sea, que en 1958 la demanda de energía representará para las mismas  $580,9 \cdot 2 = 1.161,8$  millones de kilovatios-hora/año, de los cuales (cuadro B, adjunto) tan sólo 620,8 ( $399,7 + 64,8 + 156,3 = 620,8$ ) pueden ser generados en dichas cuencas, existiendo un déficit de ( $1.161,8 - 620,8$ ) 541,0 millones de kw.-h./año en invierno.

En verano, las mismas cuencas antes citadas abastecen a centros que requieren hoy, con 4.700 h./año de utilización, energía representada por 408,7 millones de kw.-h./año ( $359,1 + 27,1 + 22,5 = 408,7$ ), que en 1958 suponemos se elevará a  $408,7 \cdot 2 = 817,4$  millones de kw.-h./año, existiendo la posibilidad de

generar 1.002,3 millones de kw.-h./año ( $799,4 + 96,1 + 106,8 = 1.002,3$ ), existirá un excedente ( $1.002,3 - 817,4$ ) de 184,9 millones de kw.-h./año en dicha época y en el período de verano.

No es, pues, posible que se enjugue el déficit invernal entre las cuencas en estudio.

La cuenca del Segura, cuyos mercados absorberán  $48 \cdot 2 = 96$  millones de kw.-h./año, en invierno tendrá una producción de 156,3, lo que supone un excedente de  $156,3 - 96 = 60,3$  millones de kilovatios-hora/año, que podría trasvasarse a la cuenca del Júcar-Cabriel, ya que la del Turia queda prácticamente equilibrada ( $31,7 \cdot 2 = 63,4$  de consumo, y 64,8 generados), disminuyendo un poco los  $501,2 \cdot 2 - 399,7 = 602,7$  millones de kw.-h./año de déficit en dichas cuencas, reduciéndolos a  $602,7 - 60,3 = 542,4$  millones de kw.-h./año.

Es, pues, preciso resignarse a pensar que en 1958 será necesario buscar energía en la época invernal para substituir a los intercambios que sirve hoy la cuenca Júcar-Cabriel.

Los millones de kw.-h. que van actualmente a abastecer Murcia, Cartagena y Alcoy podrán ser colmados en gran parte con los generados por las nuevas instalaciones de la cuenca del Segura, aunque aún reste un bloque, en números redondos, de 155 kilovatios-hora/año, que deberá ser suministrado por Júcar-Cabriel y que la época de penuria invernal representan 97 millones de kw.-h.

Actualmente (estadística del Sindicato de Agua, Gas y Electricidad de 1948), los saltos del Júcar-Cabriel abastecen en las cantidades que a continuación se citan, a las siguientes empresas, con abonados situados en el centro de España.

Cía. Ama. Electra Madrid ... ..	108,4 . 10 <sup>6</sup> kw.-h.
H. del Guadarrama ... ..	18,9 »
E. Los Carabancheles ... ..	14,3 »
F. E. del Pacífico ... ..	10,2 »
Iberduero ... ..	48,0 »
U. E. M. ... ..	35,9 »
TOTAL ... ..	235,7 »

El doble de tal consumo, que es lo que se prevé en 1958, vale 471,4 millones de kw.-h./año. Admitiendo que dicho consumo fuera en la época invernal el 75 % de la citada cantidad, tendríamos que, al no efectuarlo desde las cuencas Júcar-Cabriel, supondría un alivio para éstas de  $471,4 \cdot 0,57 = 353,5$



millones de kw.-h. En números redondos, aún le faltaría a los centros consumidores abastecidos actualmente por las cuencas Júcar-Cabriel 188,9 millones de kw.-h./año, en invierno ( $542,4 - 353,5 = 188,9$ ), y de ellos, unos 115 en la zona de Levante ( $0,75$  de 155 kw.-h./año).

Es, pues, preciso pensar, no solamente que la zona del centro de España deberá prescindir en invierno de la alimentación actualmente proporcionada por las cuencas Júcar-Cabriel, sino que a la zona de Valencia, Murcia, Cartagena y Alicante precisará auxiliarla desde fuera de las cuencas propias que consideramos, y está muy indicada para ello la térmica de Escatrón, pues no podrá hacerse con los saltos de Cataluña, porque coincidirán los regímenes hidroeléctricos de ésta y de Levante al llevarse a cabo el Plan de las Confederaciones del Júcar y del Segura. También podría auxiliarse a los centros de consumo de Levante, con los futuros aprovechamientos hidroeléctricos del Tajo y del Ebro (Fayón, principalmente).

Existe otro motivo que aconseja la unión, por medio de líneas de interconexión de los centros productores del Júcar-Cabriel y Escatrón, así como del bajo Ebro, y es el que los saltos de las cuencas estudiadas no deberán funcionar en régimen de puntas, sino de centrales-base en la época del verano, y deberán ser térmicas, o saltos de altura, o de agua fluyente con acumulación semanal, los que puedan proporcionar dichas puntas.

Todo el estudio anterior nos conduce a sacar las consecuencias:

- a) En el porvenir, en el año 1958 *no* existirá compensación de energía entre los centros productores de las cuencas del Júcar-Cabriel, Turia, Mijares, Serpis, Segura y Mundo.
- b) El que en la época de invierno exista un déficit, en números redondos, de unos 500 millones de kw.-h./año en relación con la energía necesaria en el año 1958, con 4.700 horas de utilización para los mercados actualmente abastecidos por las cuencas estudiadas, teniendo en cuenta la energía generada con regulación, saltos de pie de presa, instalaciones ampliadas de los actuales saltos y futuros aprovechamientos de empresa, indica claramente la necesidad de buscar nuevas fuentes de energía conectando

los diferentes centros de producción que hoy día no lo están.

- c) El ser precisos dicha conexión y un cambio de fuente de energía para abastecer mercados, y al mismo tiempo, el hecho de que en el actual período de estiaje, que se convertirá en uno de aguas altas, debe darse continuamente el agua para los riegos y que la energía eléctrica solamente se generará (admitiendo las 4.700 horas/año) durante 1955 horas/verano (o sea 5 meses), hace pensar en que si, por instalación de industrias, conexión de diferentes redes, planificación del uso de la energía durante la jornada, se pudiera llegar a una utilización anual de 6.994 horas (salto de Cortes de Pallás, en el Júcar con 37.500 KVA.), ello representa para los 5 meses de verano (Levante) una utilización total de 2.912 horas, o una suplementaria de 952 sobre la antes considerada; es decir, el 49 % de las 1.955 horas/verano tenidas en cuenta. La importancia del anterior tanto por ciento no necesita comentario, y por ello, todo lo que se haga para conseguirlo tendrá repercusión importante en la economía eléctrica de la Nación.

En mérito de todo lo anterior, tenemos el honor de someter a la consideración del Congreso una tercera Conclusión (para añadir a las dos enunciadas al principio de este trabajo), concebida en los siguientes términos:

3.<sup>a</sup> Para la máxima utilización de la energía generada en los saltos de pie de presa de agua fluyente situados aguas abajo de los embalses reguladores principalmente destinados a riegos, se constituirá una Junta Central de Desembalses que planificará los de los diferentes pantanos, de acuerdo con las Juntas de Desembalse de las diferentes cuencas, y ello con el fin de obtener la máxima utilización de la energía de posible generación al modular el agua para los riegos.

## CONCLUSIONES

- 1.<sup>a</sup> «Conceder preferencia primordial, entre las construcciones hidroeléctricas, a los embalses de cabecera de nuestros principales ríos, así



como a los saltos de pie de presa de los mismos, y a la ampliación de aquellos aprovechamientos situados aguas abajo de los embalses reguladores. Para que lo anterior sea eficaz, deberán dichas construcciones tener preferencia absoluta en el suministro del cemento, acero y divisas, así como en el de los elementos necesarios para la vida de los trabajadores que tales obras precisen.»

- 2.<sup>a</sup> «La rapidez en la construcción de los embalses de cabecera de nuestros principales ríos, con todas las obras a ellos anejas —desvío de caminos, expropiaciones, nuevos poblados y zonas de cultivo, etc.—, supone inversiones ingentes que el Presupuesto Nacional no puede aportar de manera normal y al ritmo necesario, y se precisa por ello el arbitrar fórmula financiera que salve tal dificultad; fórmula

la que puede consistir en levantar empréstito con la garantía del canon que supone los 2.284 millones de kw.-h./año. Tal empréstito podrá ser del orden de 1.700 a 2.000 millones de pesetas.»

- 3.<sup>a</sup> «Para la máxima utilización de la energía generada en los saltos de pie de presa y de agua fluente situados aguas abajo de los embalses reguladores principalmente destinados a riegos, se constituirá una Junta Central de Desembalses que planificará los de los diferentes pantanos, de acuerdo con las Juntas de Desembalse de las diferentes cuencas, y ello con el fin de obtener la máxima utilización de la energía de posible generación al modular el agua para los riegos.»

Madrid, 10 de mayo de 1950.

---

---

*Después de la exposición resumida hecha de los anteriores trabajos, y sin que se expongan objeciones por los reunidos, el Presidente, Sr. Oriol, levanta la sesión a las ocho y media de la noche.*







### SECCIÓN 3.ª



SECCIÓN 3.



II CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA

(28 de mayo a 3 de junio de 1950)

ACTA DE LA SESIÓN CELEBRADA EL DÍA 29 DE MAYO DE 1950

*Se abre la sesión a las diez y media horas, constituyéndose la Mesa con el Excmo. Sr. D. Aureo Fernández Ávila, Ingeniero Naval, Presidente; D. Manuel Gutiérrez Cortines, Ingeniero Industrial, Vicepresidente, y actuando como Secretario don Alberto de Ochoa y Rivas, Ingeniero Naval.*

*El Presidente otorga la palabra a D. Enrique Uriarte, que da lectura al siguiente trabajo:*

N.º 15. - Potencial hidroeléctrico de España

Autor: D. ENRIQUE URIARTE

Ingeniero de Caminos

ANTECEDENTES Y CONSIDERACIONES  
GENERALES

Desde hace más de 30 años se han preocupado diversos ingenieros de conocer las disponibilidades teóricas y prácticas de energía hidroeléctrica de España, y han admitido en la apreciación de ella una cantidad mayor a medida que transcurre el tiempo y que se va profundizando más en la catalogación y selección de las concesiones solicitadas o tanteadas.

En el Congreso de Riegos de Sevilla de 1918 se calculaba superficialmente que la potencia media teórica de España debía ser del orden de ocho millones de CV., y se suponía en la misma época que en la práctica podría limitarse a 5.000.000 CV., según Gallego Ramos, y a poco más de 2.000.000 CV., según Urrutia, pero sin incluir por éste la producida por los grandes embalses.

Esta cifra se sostiene por la mayor parte de los

técnicos; llegaron como límite a la teórica de 10 millones CV., Guillén García, y 12.483.000 CV., Pereira Carballo, en 1932.

En este mismo año 1932, González Quijano, en la publicación del Consejo de la Energía titulada «Avance para una evaluación de la energía hidráulica de España», estudia detalladamente las diversas cuencas españolas, y adjunta a su estudio las precipitaciones medias del decenio 1916-25 y los perfiles de los principales ríos; con estos datos deduce la potencia media de las cuencas, que eleva a la cantidad de 11.122.980 CV. En este estudio, lo más serio y concienzudo hecho en España, se señala que la potencia instalada y concedida se elevaba a 5.513.000 CV. y se apunta que quizá la potencia práctica sea bastante inferior.

En 1935, el señor Santasusana acepta la energía potencia teórica en 11.500.000 CV., y deduce la prác-



tica aplicando un coeficiente variable del 40 % al 70 % según las cuencas, para llegar a 6.235.000 CV.

El Ministerio de Industria, en la publicación de la Dirección General, titulada «La Industria de Producción de Energía Eléctrica en España» (julio de 1946) admite, como energía-potencia teórica hidroeléctrica en España, la deducida por González Quijano, y cifrada en 8.510.000 kw., con una energía-potencia práctica de 4.613.000 kw., y acepta las cifras de Santasusana, distribuída en cuencas o vertientes.

En estos últimos meses, la Sección del Ministerio de Obras Públicas, Servicios Eléctricos, en su «Avance de evaluación comparada de potencia y energía...» señala las mejoras que los embalses actuales y en proyecto de todas las Confederaciones hidrográficas, menos de la del Júcar, han de producir en las centrales instaladas y futuras, y que se cifra en  $5.619,82 \times 10^6$  kw.-h. aceptando los proyectos señalados en el último proyecto de U. N. E. S. A.

Por último, en el informe presentado por Mr. R. Piaton a la Comisión Económica y social del movimiento europeo titulado «La Electricidad en la Unión Europea Occidental», se señala para España una posibilidad total de 105.000 millones de kw.-h., que suponemos integrales, reduciendo a 50.000 millones las disponibilidades prácticas.

### OBJETO DE ESTE ESTUDIO

Con carácter completamente particular y por los deseos de tener idea de las disponibilidades hidroeléctricas teóricas y prácticas de algunos ríos, habíamos recogido algunos datos correspondientes a las cuencas del Ebro, Duero y zona cantábrica.

Los deseos de colaborar, dentro de nuestros modestos medios y conocimientos, en el II Congreso Nacional de Ingeniería anunciado, nos ha hecho extender el estudio al resto de las cuencas españolas. El objeto de estas notas es hacer un tanteo o avance sobre el potencial hidroeléctrico de España, teniendo en cuenta los caudales medios circulantes en los ríos principales y secundarios españoles y sus desniveles.

Hemos preferido determinar la energía potencial en kw.-h., en vez de potencia media, para evitar la duda de la utilización en horas de potencia calculada, ya que, en definitiva, se trata de la energía que produce el total de agua circulante.

Hemos señalado también las disponibilidades actuales en kw.-h., referidas al año 1946, extendiendo el tanteo, con el carácter de una primera aproximación, a las disponibilidades que consideramos de orden práctico, dentro de la energía integral y siempre referida a un año medio. Estas disponibilidades futuras las hemos clasificado en probables y posibles, incluyendo en las primeras aquellas que consideramos que, con tarifas adecuadas, tendrán rendimiento económico: las posibles las suponemos de segundo orden en su ejecución y que necesitarán tarifas superiores a las del primer escalón.

La razón de incluir esta última categoría es clara: las disponibilidades de energía hidroeléctrica tienen un primer límite, que en España, como en el resto del mundo, se agotarán con el aumento actual del consumo dentro de 15, 20 ó pocos más años, en que se construyan los saltos que podremos llamar aceptables. Al agotarse estas disponibilidades, así como las térmicas de un límite más reducido en España, y, de no encontrar otra fuente de energía económica como la desintegración nuclear, aprovechamiento de mareas, etc., se han de llevar seguramente a cabo obras para obtener energía cara, que consideradas en estos momentos quizá sean poco aconsejables económicamente, pero que podrán tener su debido rendimiento con unas tarifas suficientemente altas.

Para este estudio descompondremos la superficie española en cuencas hidrográficas, siguiendo la clasificación del Ministerio de Obras Públicas en su sección hidrográfica: en cada zona se señalarán las disponibilidades integrales teóricas y prácticas en año medio, añadiendo, además, los embalses construídos y proyectados. Empezaremos por señalar el método de estudio seguido, para terminar en un resumen de estas disponibilidades y una justificación global de los resultados obtenidos.

### GRADO DE APROXIMACIÓN DE ESTE ESTUDIO

Como advertencia general hemos de reiterar que los resultados a que se llega no deben tener más valor que los debidos a un ligero tanteo, dada la premura en llevarlos a término, así como la escasez de datos de que se ha dispuesto.

La superficie de las cuencas y los desniveles son aproximados y todos los cálculos están hechos con re-



gla de cálculo: no ha de extrañar, por lo tanto, que al totalizar las superficies de las cuencas se obtengan algunas diferencias con las de las estadísticas oficiales; a pesar de ello, resulta que en la superficie totalizada llegamos a unas cifras de 492.113 km.<sup>2</sup>, contra 492.191 km.<sup>2</sup> (Anuario Estadístico de España) y 492.245 km.<sup>2</sup>, de los del Sr. González Quijano.

Lo mismo decimos de las disponibilidades prácticas, deducidas bastantes de publicaciones oficiales, pero apreciadas otras, con carácter completamente subjetivo.

Llegamos así a unos resultados muy superiores a los señalados hasta ahora, tanto de la producción integral como en la práctica, pero que creemos aceptables como una primera aproximación.

### DATOS DE QUE SE HA DISPUESTO

Para este estudio se han dispuesto de los datos siguientes:

- a) Caudales medios mensuales de parte de los años 1913-30 publicados por el Ministerio de Obras Públicas en su plan nacional de Obras Hidráulicas de 1933.
- b) Plan general de Obras Hidráulicas de 1940.
- c) «Avance para una evaluación de la energía hidráulica de España», de González Quijano, publicado por el Consejo de Energía.
- d) Mapa pluviométrico de España, de González Quijano, de 1946.
- e) Estadísticas de la Industria eléctrica, de la Dirección General de Industria, por provincias.
- f) Publicaciones de U. N. E. S. A.
- g) Estadísticas de las centrales eléctricas españolas del Sindicato de Agua, Gas y Electricidad.
- h) Avance de evaluación comparada de potencia y energía, procedente de los aprovechamientos hidroeléctricos de España, en relación con la regulación debida a embalses y saltos de pie de presa, construídos y concedidos por el Estado (1948), Ministerio de Obras Públicas.
- i) Mapas varios.
- j) Datos particulares.

Como se puede apreciar, no han sido ni muchos ni completos los datos disponibles que se han manejado,

y ello indica el grado de aproximación de los resultados finales.

La dificultad de obtener, en el plazo limitado por este estudio, mayor número de datos, y los deseos de presentar este tanteo al II Congreso Nacional de Ingeniería, nos ha decidido a terminar este modesto trabajo con todas las deficiencias y errores consiguientes.

### PROCESO DE CÁLCULO

Con la ayuda de los perfiles de los ríos españoles consignados en el citado «Avance...», de González Quijano, y con los planos, mapa-itinerario militar de España 1 : 200.000, «Michelin» 1 : 400.000 y, en pocas ocasiones, con las hojas del Instituto Geográfico 1 : 50.000, se ha determinado para cada punto singular de cada río su cuenca vertiente en km.<sup>2</sup> y su cota sobre el nivel del mar en metros, llevándola a un gráfico, tomando con abscisas los km.<sup>2</sup> de cuenca y como ordenadas las cotas. El estudio del río Nalón, que figura en los planos que se adjuntan, nos servirá de ejemplo para indicar el proceso de cálculo de todos.

Se ha determinado seguidamente en los puntos del río donde se conocen los caudales, el caudal específico, o módulo en l. p. s. y km.<sup>2</sup> de cuenca vertiente, adoptando el correspondiente a un año normal o a la media de varios años.

Partiendo de estos módulos conocidos, se ha determinado, para cada sección del perfil limitada por dos cotas, lo que le corresponden parcial y total, teniendo en cuenta la precipitación media deducida del mapa pluviométrico. El módulo parcial, o sea, el correspondiente solamente a la sección estudiada, puede ser positivo o negativo, teniendo en cuenta de este modo la pérdida por filtración o por riego.

Cada sección del perfil representa el área de una altura (H), diferencia de cotas, por una cuenca (S) en km.<sup>2</sup>; si a esta superficie (SH) se la multiplica por un módulo o caudal (q) por km.<sup>2</sup> se obtendrá un producto equivalente a una altura por un caudal, o sea una potencia.

Si aquella superficie (SH) en vez de multiplicarla por el módulo lo hacemos por el volumen (V) de agua que por km.<sup>2</sup> discurre anualmente por esa cuenca, o sea por  $V = p \times 31,5 \times 10^6$ , el producto (SHV) nos representará el volumen total de agua que en el año



pasa por la sección multiplicada por su altura, o sea  $m^3$  de agua por altura de caída.

Englobamos los rendimientos de máquina y toda clase de pérdidas de utilización en un aprovechamiento hidroeléctrico integral, admitiendo que *un  $m^3$  de agua produce 1 kw.-h. al caer de una altura de 500 metros.*

Si el producto anterior (SHV) lo dividimos por 500, obtendremos los kw.-h. que aquella porción del río puede producir integralmente en un año normal.

En el caso del Nalón conocemos los caudales del río en Puente de Peñaflores (2.575  $km^2$  de cuenca) de 1921 a 1930, con un caudal medio de 68  $m^3$  p. s., y en Puente Porcinas (4.154  $km^2$ ) de 1916 a 1935, de 107  $m^3$  p. s., que dan los siguientes módulos:

$$\text{Puente de Peñaflores } q = \frac{68.000}{2.576} = 25,4 \text{ l. s. } km^2$$

$$\text{Puente Porcinas } q = \frac{107.000}{4.154} = 25,8 \text{ l. s. } km^2$$

La precipitación media de la cuenca es de 1.047 mm. anuales, según el mapa pluviométrico de González Quijano, con variaciones de 1.650 a 1.100 mm., correspondiendo a una escorrentía del orden de 0,574 en año medio.

De acuerdo con los módulos obtenidos y las precipitaciones, hemos determinado los módulos parciales ( $q'$ ) para cada sección, y los totales ( $q$ ), teniendo en cuenta las cuencas aguas arriba.

Estos datos se han llevado al cuadro siguiente:

(1)	(2)	(3)	(4)	(5) (6)		(7)	(8)	(9) (10)		(11)
Sección	Cuenca media S ( $km^2$ )	Diferencias cotas H (metros)	SH $\times 10^3$	MÓDULOS		V $\times 10^3 m^3$	SHV $\times 10^3$	Disponibilidades integrales		RÍOS
				Parcial $q'$ (l. s. $km^2$ )	Total $q$ l. s. $km^2$			Parcial $\times 10^6$ kw.-h.	Acumulada $10^6$ kw.-h.	
1	36,5	760	27,65	30	30	945	26,20	52,40	52,40	Nalón.
2	112	80	8,98	28	29	915	8,20	16,40	68,80	»
3	223	100	22,30	27	28	880	19,60	39,20	108,00	»
4	344	60	20,64	25	27	850	17,60	35,20	123,20	»
5	452	80	36,16	23	26,3	826	30,00	60,00	203,20	»
6	561	80	44,88	20	25,1	790	35,40	70,80	274,00	»
7	30	800	24,00	30	30	945	22,70	45,40	319,40	Aller.
8	79	140	11,05	28	29,4	925	10,20	20,40	336,80	»
9	32	340	10,87	28	28	880	9,52	19,04	358,84	Braña.
10	78,5	90	7,06	27	27,6	870	6,16	12,32	371,16	»
11	219	60	13,14	25	27,5	866	11,39	22,78	393,95	Aller.
12	315	150	47,10	23	26	820	38,60	77,20	471,14	»
13	27	970	26,20	30	30	945	24,80	49,60	520,74	Pajares.
14	79	80	6,30	28	29	915	5,76	11,52	532,26	»
15	50	850	42,50	29	29	915	38,80	77,60	609,86	Huerna.
16	235	70	16,55	27	28,4	895	14,80	29,60	939,46	Pajares.
17	296	30	8,88	25	28	880	7,78	15,56	655,92	»
18	730	50	36,50	23	26,5	835	30,50	61,00	716,02	Aller.
19	796	40	31,84	20	26	820	26,10	52,20	768,22	»
20	27,5	740	20,35	25	25	785	15,90	31,80	800,02	Riosa.
21	884	40	35,36	20	25,9	815	28,80	57,60	857,62	Aller.
22	1.534	40	61,36	20	25,2	795	48,55	97,10	954,72	Nalón.
23	28,5	1.410	40,35	30	30	945	38,20	76,40	1.031,12	Trubia.
24	29	1.430	41,45	30	30	945	39,10	78,20	1.109,32	Ricabo.
25	160	140	22,40	28	29	915	20,50	41,00	1.150,32	Trubia.
26	25	1.370	34,25	30	30	945	32,30	64,60	1.214,92	Teverga.
27	88	40	3,52	28	29,6	930	3,28	6,56	1.221,48	»
28	163	120	18,50	26	27,7	873	16,15	32,30	1.253,78	»
29	419	40	16,76	25	28,3	890	14,90	29,80	1.283,58	Trubia.
30	464	110	51,00	23	27,5	865	44,05	88,10	1.371,68	»
31	40	200	8,00	25	25	785	6,27	12,54	1.384,22	Nora.
32	165	30	4,50	20	21,5	677	3,05	6,10	1.390,32	»
33	303	40	12,12	20	21,2	666	8,10	16,20	1.406,52	»
34	388	60	23,28	19	20,8	655	15,60	31,20	1.437,72	»
35	2.518	40	100,72	18	24,6	775	83,00	166,00	1.603,72	Nalón.
36	30,5	790	24,10	26	26	820	19,80	39,60	1.643,32	Cubia.
37	135	220	29,70	20	20,8	655	19,50	39,00	1.683,32	»
Suma y sigue ...							841,06	1.682,32		



(1)	(2)	(3)	(4)	(5) (6)		(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Sección	Cuenca media S (km <sup>2</sup> )	Diferencias cotas H (metros)	S H x 10 <sup>3</sup>	MÓDULOS		V x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	SHV x 10 <sup>9</sup>	Disponibilidades integrables		RÍOS
				Parcial q' (l. s. km <sup>2</sup> )	Total q l. s. km <sup>2</sup>			Parcial x 10 <sup>6</sup> kw.-h.	Acumulada 10 <sup>6</sup> kw.-h.	
		Suma anterior	...	...	...	...	841,06	1.682,32		
38	2.801	10	28,01	17	24	755	21,20	42,40	1.724,72	Nalón.
39	22,5	100	24,75	30	30	945	23,30	46,60	1.771,32	Narcea.
40	92,5	90	8,30	28	28,6	900	7,46	14,92	1.786,24	»
41	161	80	12,88	28	28,4	895	11,50	23,00	1.809,24	»
42	26	620	16,10	28	28	880	14,20	28,40	1.836,64	Coto.
43	77	80	6,16	28	28	880	5,43	10,86	1.848,50	»
44	290	70	20,30	26	26	820	16,65	33,30	1.881,80	Narcea.
45	24	800	19,20	28	28	880	16,90	33,80	1.914,60	Noviego.
46	73	80	5,84	26	27	850	4,45	8,90	1.923,50	»
47	26,5	700	18,55	30	30	945	17,50	35,00	1.958,50	»
48	76	60	4,50	28	29	915	4,12	8,24	1.966,74	»
49	205	80	16,40	25	27,6	870	14,30	28,60	1.996,34	»
50	551	80	44,08	20	27	850	37,40	74,80	2.071,14	Narcea.
51	631	20	12,62	20	26	820	10,30	20,60	2.091,74	»
52	38,5	560	21,50	28	28	880	19,00	38,00	2.129,74	Arganza.
53	117	100	11,70	26	26,8	845	9,85	19,70	2.149,44	»
54	223	160	35,60	25	25,4	800	28,50	57,00	2.206,44	»
55	972	40	33,88	20	25,6	805	31,05	62,10	2.268,54	Narcea.
56	54	780	42,10	25	25	785	33,00	66,00	2.335,54	Tuña.
57	1.148	60	68,88	20	25	785	54,00	108,00	2.442,54	Narcea.
58	1.234	35	43,20	20	24,7	775	33,55	67,10	2.509,64	»
59	15	800	12,00	28	28	880	10,52	21,04	2.530,68	Pigüenza.
60	59	150	8,85	25	26	820	7,25	14,50	2.545,18	»
61	14	750	10,56	30	30	945	9,95	19,90	2.565,08	Somiedo.
62	52	180	9,35	26	27,4	864	8,10	16,20	2.581,28	»
63	86	30	2,58	25	27,2	855	2,21	4,42	2.585,70	»
64	13,5	820	11,10	28	28	880	9,75	19,50	2.605,20	Salencia.
65	37,5	90	3,57	25	26,6	838	2,82	5,64	2.610,84	»
66	149	40	5,96	24	26,0	820	4,90	9,80	2.620,64	Somiedo.
67	174	100	17,40	23	25,6	805	13,95	27,90	2.648,54	»
68	309	80	24,72	20	25	785	19,40	38,80	2.687,34	Pigüenza.
69	388	70	27,16	20	23	725	19,65	39,30	2.726,64	»
70	453	180	81,50	18	22,8	716	58,40	116,80	2.843,44	»
71	1.755	60	105,30	18	24,2	760	80,00	160,00	3.003,44	Narcea.
72	37	340	12,60	18	22,8	717	9,00	18,00	3.021,44	Noviego.
73	1.812	40	72,48	18	24	755	54,50	109,00	3.130,44	Narcea.
74	4.750	10	47,50	16	24	755	35,80	71,60	3.202,04	Nalón.
75	4.779	10	47,79	16	24	755	36,00	72,00	3.274,04	»
							1.637,02	3.274,04		

La columna (1) representa el número de orden de las secciones del perfil, la (2) la abscisa media de los triángulos o trapecios en km<sup>2</sup>, la (3) la diferencia de cotas en metros, la (4) el producto de (2) x (3) en miles, la (5) el módulo parcial de la sección (1) en l. s. km<sup>2</sup>, la (6) el módulo total teniendo en cuenta las secciones de aguas arriba en l. s. km<sup>2</sup>, la (7) el número de m<sup>3</sup> que pasan por la sección (1) en año medio, o sea,  $31,5 \times 10^6$ ,  $q \times 10^3$ , el (8) el producto (2) x (3) x (8) en miles de millones, el (9) el número (8) dividido por 500 en mill. de kw.-h., la (10) los

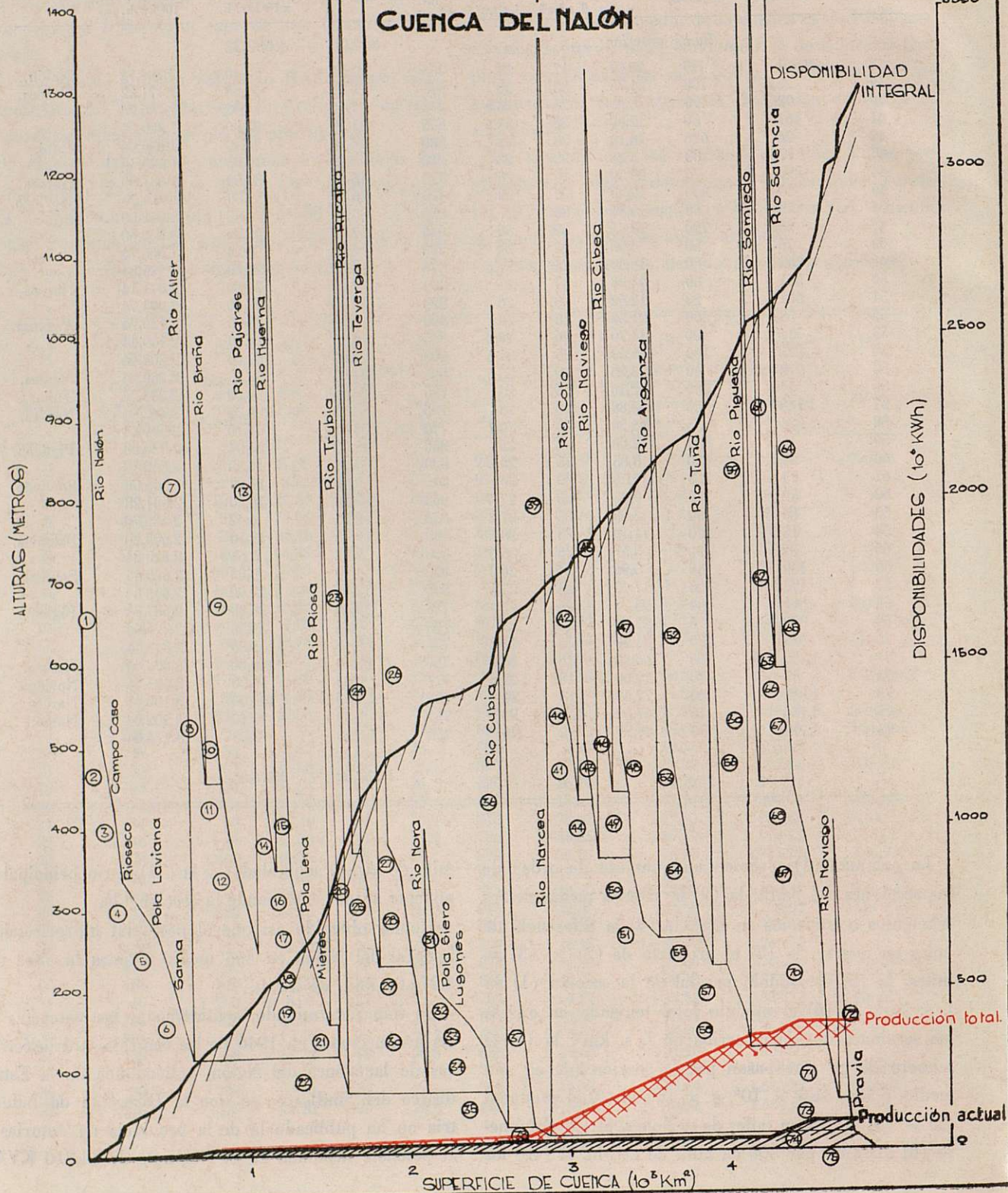
mill. de kw.-h. acumulados y la (11) el río principal o afluente a que corresponde la sección (1).

Hemos obtenido así que el potencial hidroeléctrico integral del Nalón en año medio alcanza la cifra de 3.274,04 mill. de kw.-h.

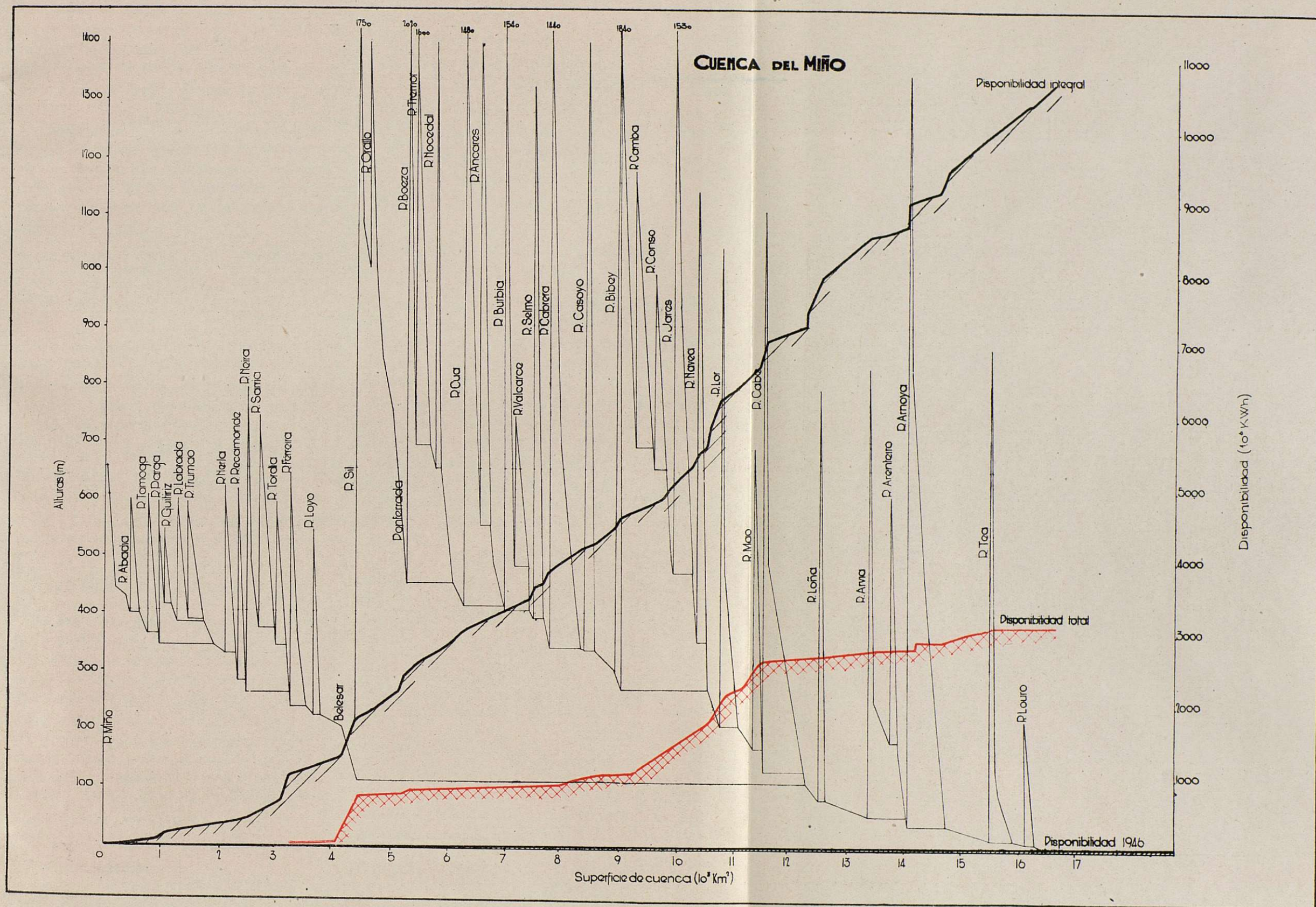
Se han determinado seguidamente las potencias y las producciones en 1946 de las centrales hidroeléctricas de la cuenca del Nalón, valiéndonos de la Estadística del Sindicato, ya que la Dirección de Industria no ha publicado la de la provincia de Asturias: la potencia instalada en el Nalón es de 34.810 KVA.



# CUENCA DEL NALÓN













y la producción en 1946 del orden de 88,639 mill. de kw.-h. En las cuencas donde se dispone de ambas Estadísticas, a las producciones dadas por el Sindicato se añaden las supuestas a las centrales hidroeléctricas no consignadas en aquélla, aplicando a la potencia unas horas de utilización del orden de las de igual categoría conocidas.

Se han estudiado después los aprovechamientos en construcción o como obras de mejoras, tales como los saltos de Riera, Priañes, Florida, etc., y los proyectos que se han reseñado en el Boletín Oficial del Narcea, Orle, etc., y se han fijado, en definitiva, las disponibilidades como sigue:

Disponibilidad actual (1946) ... ..	88,64 mill. de kw.-h.
» probable ... ..	58,00 »
» posible ... ..	254,20 »
<hr/>	
	400,84 mill. de kw.-h.

Como las disponibilidades integrales han representado la cifra de 2.774,04, llamamos rendimiento de la cuenca la relación de las primeras a la segunda, o sea, el tanto por ciento de disponibilidades prácticas de la disponibilidad integral.

$$400,84 : 2.774,04 = 12,25 \%$$

Con idénticos criterio y procedimiento se han determinado para cada cuenca las disponibilidades integrales, las actuales de 1946 y las futuras, cuyos resúmenes aparecen en las siguientes páginas.

## DIVISIÓN DE ESPAÑA EN ZONAS

Para este estudio admitimos, como hemos dicho antes, la división de las cuencas españolas tal como lo hace la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas en sus Divisiones de agua o Confederaciones Hidrográficas, separando únicamente las de las vertientes francesas (Valle de Arán, Arlegui, etcétera) de la Confederación del Ebro y las pequeñas zonas de Támega y otros afluentes del Duero portugueses (por su proximidad a la zona gallega) de la del Duero, incluyéndolos en la del Cantábrico y NO.

La división es como sigue:

I.—Zona del Cantábrico y Noroeste de España.

II.—Cuenca del Ebro,

III.—Cuenca del Duero.

IV.—Cuenca del Tajo.

V.—Cuenca del Guadiana.

VI.—Cuenca del Guadalquivir.

VII.—Zona del Sur y Sudeste de España.

VIII.—Cuenca del Segura.

IX.—Zona de Levante (Júcar); es decir, la correspondiente a la Confederación del Júcar.

X.—Zona del Pirineo Oriental.

XI.—Zona vertiente a ríos franceses.

## I.—ZONA CANTÁBRICA Y NOROESTE \* DE ESPAÑA

Comprende desde el Bidasoa hasta el Miño, incluyendo en ella, además, las pequeñas vertientes a ríos portugueses que, o bien van directamente al Atlántico, como el Lima, o son afluentes del río Duero, en Portugal.

La superficie total alcanza 55.216 km<sup>2</sup>, de los que corresponden a la vertiente portuguesa 501 km<sup>2</sup> del río Miño, o sea, en total a la zona española 54.715 km<sup>2</sup>.

La precipitación media anual de toda la cuenca es de 1.380 mm. Corresponden 1.270 mm. al Miño y 1.407 al Nalón: El desagüe al mar de todos los ríos de esta zona representa un volumen de 40.315 Hm<sup>3</sup> en año medio.

Dentro de esta zona está incluido el río Miño, cuya superficie de cuenca le da la categoría del octavo en cuencas españolas y el séptimo en la cuenca peninsular, teniendo en cuenta los ríos principales de España. En su recorrido representa también el octavo de la Península. Es frontera en 91,7 km. de longitud en su parte final. Su pendiente media es bastante uniforme; 1,68 metros por km. de longitud, contando el río desde su confluencia con el de Valdijada, a 4,7 km. de su origen. La pendiente del río hasta su confluencia con el Sil es de 2,70 por 1.000, desde el Sil hasta la frontera de 1,04 y desde la frontera al mar de 0,30, resultando, por tanto, un interesante valor hidroeléctrico, principalmente, hasta su confluencia con el Sil. Mayor valor aún tiene su más importante afluente, el río Sil.

Los ríos estudiados, que comprenden la totalidad de



la zona, con sus cuencas, disponibilidades integrales y producción en 1946, han sido:

R Í O S	Cuencas km <sup>2</sup>	Disponibili- dad integral 10 <sup>6</sup> kw.-h.	Disponibili- dad 1946 10 <sup>6</sup> kw.-h.
Bidasoa (España) ... ..	758	256,00	62,805
Urumea... ..	254	149,08	46,193
Oria... ..	831	284,06	57,519
Urola... ..	346	66,48	10,463
Deva (Guipúzcoa)... ..	547	124,12	25,382
Nervión ... ..	1.773	364,81	15,548
Ason... ..	626	132,36	19,749
Miera ... ..	304	92,56	—
Pas ... ..	720	255,26	2,740
Besaya... ..	1.100	507,52	28,823
Nansa ... ..	424	231,32	—
Deva (Asturias) ... ..	1.141	1.301,22	75,112
Nalón ... ..	4.819	3.274,04	88,639
Navia... ..	2.538	1.546,98	204,800
Canero ... ..	460	244,22	2,069
Sella... ..	1.390	691,59	3,671
Eo ... ..	984	300,94	3,170
Eume ... ..	438	286,80	20,286
Mandeo ... ..	415	215,30	1,100
Jallas... ..	442	189,04	29,645
Tambre ... ..	1.490	689,76	56,593
Ulla ... ..	2.612	1.310,16	4,700
Umia... ..	404	164,80	1,518
Lérez... ..	372	166,80	14,127
Miño (España)... ..	16.074	10.705,00	25,180
Limia (España) ... ..	1.528	927,82	0,350
Secundarios A... ..	3.879	1.101,52	5,404
» B... ..	8.046	1.564,82	31,869
	54.715	27.155,38	837.455

En los ríos secundarios, A, se incluyen las cuencas comprendidas entre los ríos principales reseñados desde el Bidasoa hasta el Eo; es decir, en las provincias de Guipúzcoa, Vizcaya, Santander y Asturias.

En el secundario, B, se incluyen los de Galicia, entre el Eo y el Miño, así como las cabeceras de varios afluentes de ríos portugueses tributarios del Duero, como el Támega, Tua y Sabor, cuya superficie española representa 1.873,6 km<sup>2</sup> y su potencial hidroeléctrico 317,00 mill. de kw.-h.

Estudiados los proyectos de aprovechamientos en ejecución, las concesiones de la zona y las posibilidades de otros aprovechamientos, entre ellos algunos transvases, además de los de Zadorra y Bayas, en ejecución, se llega al resultado siguiente, en año normal:

Disponibilidades actuales (1946) ... ..	837.455 mill. kw.-h.
» probables... ..	3.351.120 » »
» posibles... ..	2.095.340 » »
	6.283.915 mill. kw.-h.

En los gráficos adjuntos se han representado para el Miño y el Nalón el perfil *cuencas-alturas*, la disponibilidad integral acumulada y las disponibilidades prácticas actuales y totales.

Como las disponibilidades integrales alcanzan, siempre en año medio,  $27.155,38 \times 10^6$  kw.-h., el tanto por ciento en la práctica, o sea, su rendimiento, resulta de 23,1 %.

Se han determinado también dentro de las zonas los embalses construídos, incluso los de abastecimiento de poblaciones, los probables y los posibles. Se han determinado también las disponibilidades útiles de los embalses supuestos llenos y utilizados una sola vez, con el desnivel práctico y posible de sus aprovechamientos.

El resumen es el siguiente:

EMBALSES	N.º	Capacidad Hm <sup>3</sup>	Disponibili- dad de los em- balses llenos 10 <sup>6</sup> kw.-h.
Construídos ... ..	6	210,7	82,4
Probables ... ..	12	1.537,0	937,6
Posibles ... ..	15	896,9	871,2
	33	2.644,6	1.891,2

De los 33 embalses, uno corresponde al Estado (el de Bárcena, en el Sil), que se ha supuesto como probable con 200 Hm<sup>3</sup>, y otro, el de Ordunte, destinado al abastecimiento de Bilbao (22 Hm<sup>3</sup>). En la publicación de O. P. 1948 «Avance ...», solamente se tiene en cuenta el pantano de Bárcena, con 180 Hm<sup>3</sup> de capacidad.

## CUENCA DEL EBRO

El Ebro, por la extensión de su cuenca, es el primer río de España y el segundo de la Península; con relación a su recorrido, de 927,9 km., representa también el núm. 1 dentro de España y el segundo de la Península; su cuenca se extiende a 15 provincias españolas.

Su pendiente media, contando desde Reinosa, es de 0,95 por mil, sin tramo de gran pendiente en todo su recorrido y con las pendientes medias siguientes:

Entre Reinosa y Miranda, 2,18 por mil.

» Miranda y confluencia del Segre, 0,70 por mil.

» confluencia del Segre y Tortosa, 0,60 por mil.











En la cuenca del Ebro incluimos la pequeña zona de la cabecera del Segre (470 km<sup>2</sup>) que pertenece a Francia; la del Valira, en Andorra, con 474 km<sup>2</sup> de los 495 de la superficie del Principado, y la del Írati en su cabecera, de 54,3 km<sup>2</sup> también en Francia. Con ellos la superficie de la cuenca vertiente es de 83.530 km<sup>2</sup> y, restando estas superficies, que suman 998,3 km<sup>2</sup>, queda como cuenca española 82.132 km<sup>2</sup>. Consideramos, sin embargo, como pertenecientes a esta cuenca para sus disponibilidades teóricas integrales y para las prácticas, las correspondientes a los ríos Valira e Írati, ya que ambos son actualmente utilizados en España.

La precipitación media de la cuenca total es de 621 mm., según el mapa de González Quijano, y el volumen vertido al mar en España en año medio se eleva a la cifra de 20.378 Hm<sup>3</sup>.

La superficie de cuenca de los principales afluentes, las disponibilidades integrales en año medio y la producción en 1946, son del orden siguiente:

R Í O S	Cuenca km <sup>2</sup>	Disponibili- des integrales 10 <sup>6</sup> kw.-h.	Disponibili- des 1946 10 <sup>6</sup> kw.-h.
Rudrón ... ..	415	41,38	0,250
Oca ... ..	1.065	129,24	0,380
Nela... ..	1.095	128,30	0,679
Valderrama ... ..	45	10,08	1,000
Bayas ... ..	366	72,30	0,553
Zadorra... ..	1.335	169,82	1,210
Tirón ... ..	1.180	238,84	2,470
Najerilla... ..	1.047	371,82	11,777
Iregua ... ..	693	187,16	1,400
Leza ... ..	554	150,22	0,348
Ega ... ..	1.373	163,50	23,887
Cidacos ... ..	702	157,24	0,280
Aragón (España) ... ..	8.849	3.092,68	61,900
Alhama... ..	472	140,90	0,050
Keiles ... ..	574	72,70	14,283
Arba ... ..	2.070	198,08	0,050
Jalón ... ..	9.975	977,06	30,508
Huerva... ..	902	49,54	0,840
Gállego... ..	3.625	1.662,42	205,960
Martín ... ..	1.973	57,16	4,020
Guadalupe... ..	3.914	414,00	8,174
Segre (España) ... ..	21.523	11.932,60	1.128,700
Matarranya... ..	1.524	66,18	0,730
Ebro (resto) ... ..	17.261	10.163,02	169,357
	82.532	30.646,24	1.668,806

Tanteados los proyectos de la cuenca y clasificados, podemos señalar, como resumen, las siguientes disponibilidades, en año medio:

Disponibilidades actuales (1946) ... ..	1.668.806 mill. kw.-h.
» probables ... ..	5.396.380 » »
» posibles ... ..	2.775.490 » »
» prácticas ... ..	9.840.676 mill. kw.-h.

Como las disponibilidades integrales de la cuenca ascienden a 30.646,24 mill. de kw.-h., el rendimiento de la misma es el 31,9 %.

Adjuntamos, como para todas las cuencas, el perfil *cuenca-alturas*, y en él las disponibilidades acumuladas integrales, y las prácticas actuales y futuras.

Con el mismo criterio de siempre los embalses de la cuenca del Ebro son:

	Nú- mero	Capacidad Hm <sup>3</sup>	Disponibilidad embalse lleno mill. kw.-h.
Embalses construídos ... ..	20	1.374,4	884,1
» probables... ..	22	1.347,8	716,9
» posibles ... ..	32	1.403,2	1.037,5
	74	4.125,4	2.638,5

Lo mismo que en el apartado anterior, las disponibilidades útiles las suponemos con embalse lleno y solamente por una vez. De estos embalses corresponden al Estado 28 con 2.170,6 Hm<sup>3</sup>, y han sido tenidos en cuenta en el citado Informe de O. P. (1948) solamente 10 con 1.830 Hm<sup>3</sup>, por no tener los demás del Estado interés hidroeléctrico. La descomposición de estos embalses es la siguiente:

CUENCAS	TOTALES		DEL ESTADO		INFORME O. P.	
	N.º	Capaci- dad Hm <sup>3</sup>	N.º	Capaci- dad Hm <sup>3</sup>	N.º	Capaci- dad Hm <sup>3</sup>
Segre ... ..	43	2.099,7	9	774,2	4	633,0
Afluentes margen izquierda ... ..	13	921,1	3	483,0	2	514,0
Idem derecha ... ..	15	373,4	15	373,4	3	143,0
Ebro ... ..	3	731,2	1	540,0	1	540,0
	74	4.125,4	28	2.170,6	10	1.830,0

De estos embalses, en dos (Reinosa y Capdella) su capacidad es inferior a su aportación media con 250 Hm<sup>3</sup> de exceso, que representa 201,8 mill. kw.-h.

## CUENCA DEL DUERO

La cuenca en España asciende a 78.194 km<sup>2</sup>, con un total en la Península de 98,375 km<sup>2</sup> y con un reco-



rrido total de 913,6 km., de los cuales corresponden a España 687, y de ellos 127,4 a zona fronteriza. Resulta, pues, este río el primero en superficie de cuenca, dentro de la Península, y el segundo en España, y el tercero, en ambos casos, con relación al recorrido. Se extiende a 10 provincias.

Su perfil es claramente de río de meseta que se precipita con fuerte pendiente en el tramo fronterizo; su pendiente media desde Vinuesa (a 29,7 km. del origen) al mar es de 1,33 por mil. Esta pendiente se distribuye en 1,22 por mil entre Vinuesa y el Esla, 3,09 entre el Esla y el Huebra y 0,57 por mil del Huebra al mar.

Su precipitación media, según el mapa de González Quijano, es de 640 mm., la cual aporta a Portugal en Barca d'Alva, en año medio, unos 13.595 mill. de m<sup>3</sup>, de ellos 5.390 debido al Esla y 3.300 al Pisuerga.

La superficie de las cuencas de sus afluentes y del río principal en sus diversos tramos, las disponibilidades integrales, prescindiendo del tramo del Duero entre Castro-Tormes, por pertenecer a Portugal, y las disponibilidades actuales son:

R í o s	Cuenca km <sup>2</sup>	Disponibili- dad integral 10 <sup>6</sup> kw.-h.	Disponibili- dad actual 1946 mill. kw.-h.
Rituerto ... ..	793	29,78	—
Escalope ... ..	618	25,90	—
Ucero... ..	1.068	49,64	—
Perales... ..	656	27,20	—
Riaza ... ..	1.087	56,70	0.450
Duración ... ..	1.443	81,44	6.732
Cega ... ..	2.502	111,20	0.571
Duero (hasta Pisuerga)... ..	7.314	807,24	17.280
Pisuerga ... ..	16.158	1.532,26	36.509
Eresma ... ..	5.439	716,06	8.418
Zapardiel ... ..	1.292	22,40	—
Trabancos... ..	784	16,34	—
Guareña ... ..	1.090	12,52	—
Valderabuey ... ..	3.796	79,44	—
Duero (entre Pisuerga y Esla) ... ..	3.342	1.155,73	27.830
Esla ... ..	16.096	4.689,16	510.156
Tormes ... ..	6.962	1.670,98	9.399
Huebra ... ..	2.959	759,34	0.700
Águeda ... ..	2.585	546,60	2.039
Duero (resto) ... ..	2.210	6.768,40	—
	78.194	19.158,33	620.084

Se ha prescindiendo de la energía integral del Duero entre el actual salto de Castro en construcción y la confluencia del Tormes, que representa unos 4.000 mill. de kw.-h. como disponibilidades integrales, así

como desde el Águeda a Barca d'Alva con 135,95 mill. kw.-h. El Duero hasta Barca d'Alva tendrá en año medio unas disponibilidades integrales de 23.294,28 mill. de kw.-h., correspondiendo a España, por el convenio Hispano-Portugués, 19.158,33 mill. kw.-h.

También hemos prescindiendo de 1.873,6 km<sup>2</sup> de las cuencas del Támega, Tua y Sabor, que hemos incluido en la zona llamada del Cantábrico y Noroeste.

Las disponibilidades calculadas en esta cuenca son:

Disponibilidades actuales (1946) ... ..	620,08 mill. kw.-h.
» probables... ..	4.207,49 » »
» posibles ... ..	1.079,00 » »
» prácticas ... ..	5.906,57 mill. kw.-h.

Con las disponibilidades integrales de 19.158,33 mill. kw.-h. el rendimiento de las cuencas españolas del Duero y correspondiente a España representa un 30,8 %. Los embalses construidos y proyectados con sus capacidades y disponibilidades, por una sola vez, a embalse lleno, son:

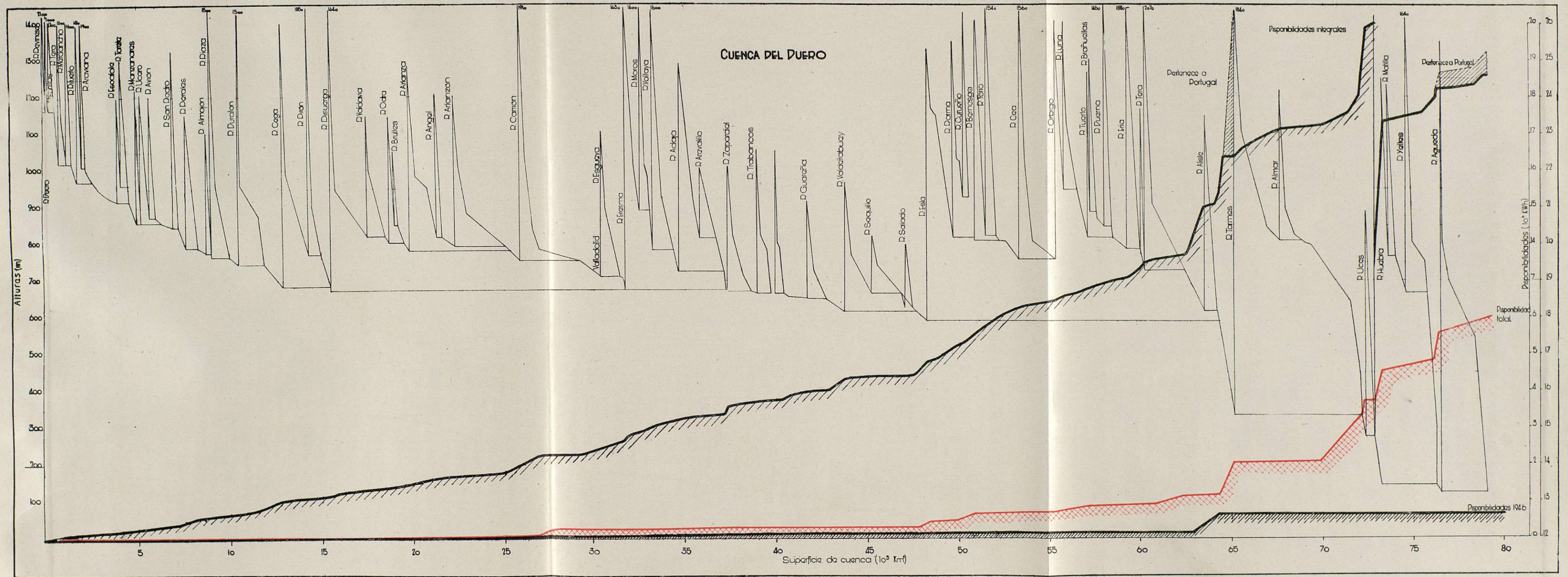
	Nú- mero	Capacidad Hm <sup>3</sup>	Disponibili- dad útil mill. kw.-h.
Embalses construidos... ..	9	2.225,0	1.220,79
» probables ... ..	6	816,0	798,80
» posibles... ..	9	1.124,8	547,19
	24	4.165,8	2.566,78

De estos 24 embalses corresponden al Estado 15 con 1.884,8 Hm<sup>3</sup>, y se han tenido en cuenta en el informe de O. P. siete con 1.103 Hm<sup>3</sup>.

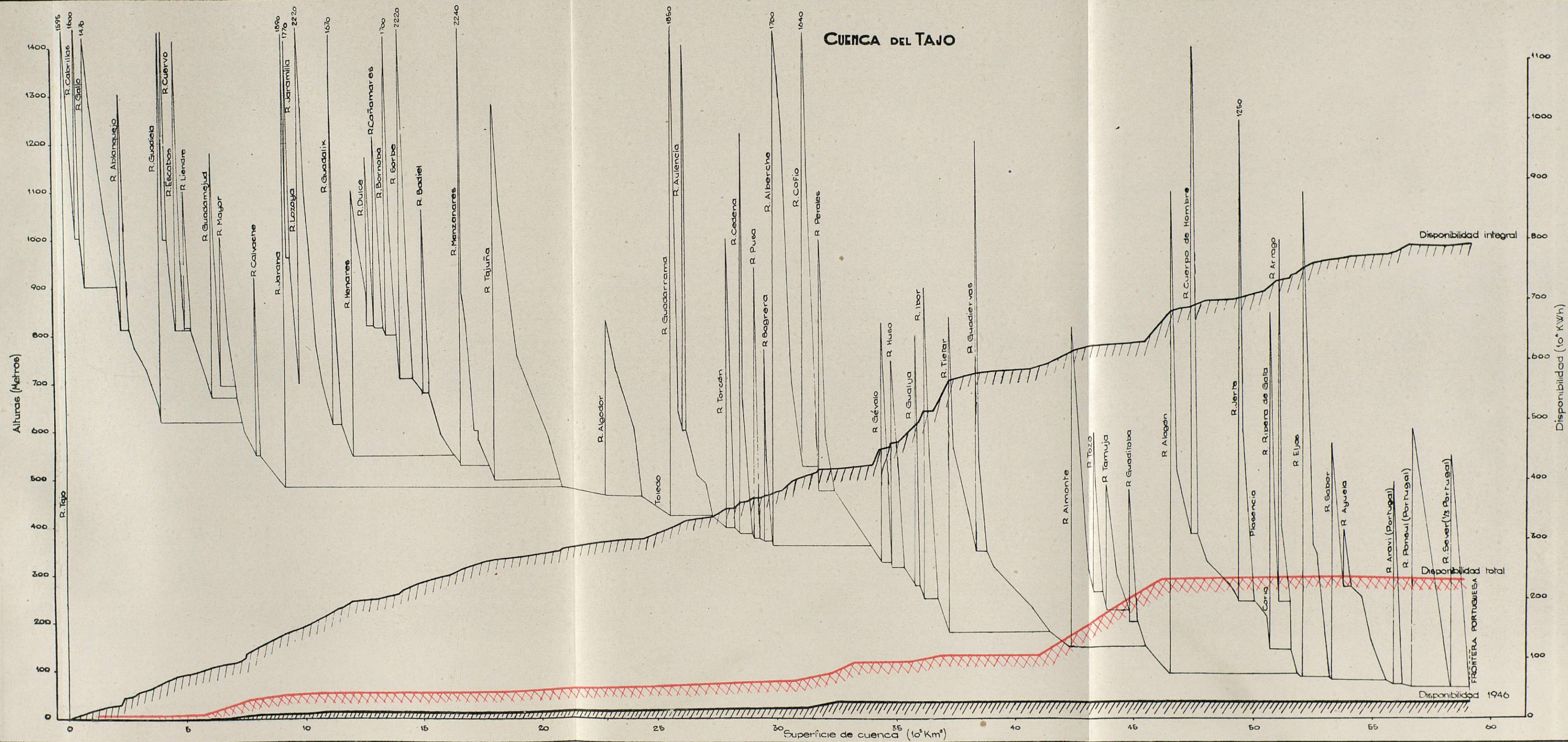
## CUENCA DEL TAJO

La cuenca de este río en la Península alcanza la cifra de 80.947 km<sup>2</sup>, de los que corresponden a la parte española 56.737, o sea el 70 por 100. La superficie de los afluentes del Tajo en la zona portuguesa, pero que aportan sus aguas antes de dejar de ser frontera, es de 2.248 km<sup>2</sup>, con un potencial de 99,92 millones de kw.-h. que restamos de las disponibilidades de esta cuenca. Su recorrido total es de 1.120,2 km., distribuidos en 819,5 en España, 43,2 como frontera y 257,5 km. en Portugal. Corresponde en categoría el tercero puesto como río peninsular, en cuanto a cuenca, y el primero en reco-

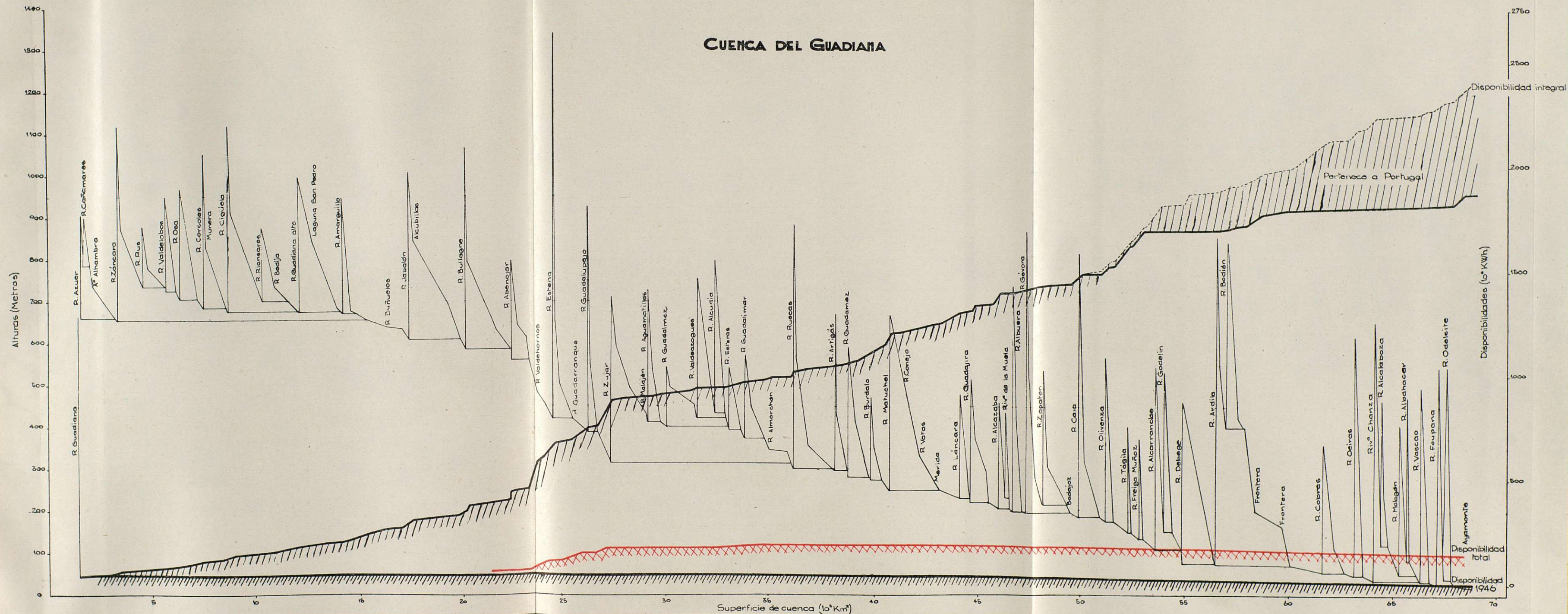


















rrido, y dentro solamente de la zona española el cuarto y segundo, respectivamente.

Su aportación a Portugal en el punto que deja de ser frontera asciende, en año medio, a 5.257 Hm<sup>3</sup>; de ellos 1.574 procedentes del Jarama.

Es el Tajo un río de poca pendiente, con una media de 0,97 por mil desde la confluencia con el río Cabrillas al mar, y de 0,7 por mil desde el Guadiela. Su cuenca se extiende por seis provincias.

La precipitación media es de 628 mm.

Las cuencas parciales, disponibilidades integrales y disponibilidades en 1946, son las siguientes:

R Í O S	Cuenca km <sup>2</sup>	Disponibili- dades inte- gros mill. kw.-h.	Disponibili- dades 1946 mill. kw.-h.
Gallo ... ..	1.364	137,90	0.550
Guadiela ... ..	3.422	380,78	11.834
Tajo (hasta Jarama)... ..	4.390	916,34	61.946
Jarama... ..	11.655	1.418,16	50.109
Algodor... ..	1.530	20,10	—
Guadarrama ... ..	1.726	132,72	0.600
Tajo (entre Jarama y Alberche) ... ..	5.726	765,20	33.064
Alberche ... ..	4.097	484,38	118.925
Huso ... ..	552	14,98	—
Ibor... ..	493	18,32	—
Tiétar ... ..	4.146	262,74	2.735
Almonite ... ..	3.061	131,42	0.012
Alagón... ..	5.371	687,98	6.766
Eljas ... ..	1.160	91,54	—
Sabor ... ..	2.257	59,78	0.200
Ponsul... ..	1.600	82,00	—
Sever ... ..	802	24,30	0.350
Tajo (resto) ... ..	5.633	2.422,96	4.042
	58.985	8.051,60	291.133
Cuenca parcial portuguesa.	2.248	99,92	—
Cuenca española del Tajo.	56.737	7.951,68	291.133

Las disponibilidades actuales y futuras las podemos admitir como sigue:

Disponibilidades actuales (1946) ... ..	291,13 mill. kw.-h.
» probables ... ..	2.014,95 » »
» posibles... ..	80,00 » »
	2.386,08 mill. kw.-h.

Dado el potencial integral que hemos fijado en

7.951.68 mill. kw.-h. el rendimiento práctico en la zona española, en año medio, es de 30,1 por 100.

Los embalses actuales y futuros con sus volúmenes y disponibilidades a embalse lleno, serán:

	Nú- mero	Capaci- dad Hm <sup>3</sup>	Disponibili- dades útiles mill. kw.-h.
Embalse construido... ..	8	447,8	146,7
» probable ... ..	12	4.283,8	1.102,6
» posible... ..	7	253,0	121,3
	27	4.984,6	1.370,6

De estos embalses corresponden al Estado 19, con 3.246,6 Hm<sup>3</sup>, y de ellos 4 al abastecimiento de Madrid, con 91,5 Hm<sup>3</sup>. En el informe de O. P. se han tenido en cuenta 8 con 3.086,7 Hm<sup>3</sup>. Se incluye, entre los del Estado, el de Buendía, hiperembalse, cuya capacidad excede a la aportación media anual con 768 Hm<sup>3</sup>, que representa una disponibilidad de 218 millones kw.-h.

## CUENCA DEL GUADIANA

La cuenca total en la Península es de 66.703 km<sup>2</sup>. Corresponden a España 54.708 km<sup>2</sup>, o sea el 82 por 100, con lo que resulta el cuarto con relación a su cuenca en la Península, y el quinto con relación a las cuencas solamente españolas.

Su recorrido total es de 743,7 km., de los cuales son frontera 121,4 km. en dos tramos, y de recorrido portugués 149,4 km. Resulta, con relación al recorrido, el cuarto y el quinto según se tenga en cuenta el peninsular o solamente el de España.

Es el Guadiana el río de menos pendiente de España, con 0,84 por mil desde los Ojos del Guadiana al mar; y el de menos aportación con relación a su categoría y a su cuenca, ya que en año medio vierte al mar unos 2.868 Hm<sup>3</sup>, de los cuales 615 Hm<sup>3</sup> proceden del Zúncara. Su pendiente hasta el Zújar es de 1,08 por mil, y desde el Zújar al mar 0,645 por mil.

Su cuenca baña ocho provincias españolas, y su precipitación media es de 515 mm.

La superficie de sus cuencas, afluentes y principales, sus disponibilidades integrales y las de 146, son:



R Í O S	Cuenca km <sup>2</sup>	Disponibili- dades inte- grales mill. kw.-h.	Disponibili- dades 1946 mill. kw.-h.
Azuer ... ..	1.800	17,50	—
Záncara ... ..	11.838	184,00	4.305
Jabalón ... ..	2.396	21,46	—
Bullaque ... ..	2.117	32,48	—
Abenójar ... ..	872	16,74	—
Guadiana (hasta R. Valde- hornos) ... ..	3.459	296,30	5.161
Estena ... ..	928	10,80	—
Guadalupejo ... ..	552	13,02	—
Guadiana (entre Val y Zú- jar) ... ..	1.880	245,90	1.100
Zújar ... ..	8.624	117,87	—
Ruecas ... ..	1.846	54,70	—
Ortigas ... ..	522	4,44	—
Guadalimez ... ..	1.016	11,72	—
Búrdalo ... ..	529	2,80	—
Matuchel ... ..	2.512	56,80	—
Láncara ... ..	464	5,28	—
Guadajira ... ..	968	10,98	—
Albuera ... ..	452	12,60	—
Gevora ... ..	2.146	29,16	0,020
Guadiana (entre Zújar y frontera) ... ..	3.432	319,98	4.146
Caía ... ..	948	27,90	—
Albarrancho ... ..	968	18,92	0.100
Debege ... ..	1.632	24,92	—
Ardila ... ..	3.704	107,38	1.065
Cobres ... ..	1.008	11,10	—
Oeiras ... ..	430	11,50	—
Chanza ... ..	2.160	36,40	—
Vascão ... ..	470	12,20	—
Foupana ... ..	766	22,02	—
Guadiana (resto) ... ..	6.264	640,00	—
	66.703	2.376,87	15.897
Cuenca portuguesa ... ..	11.995	468,14	—
Cuenca española ... ..	54.708	1.908,73	15.897

Las disponibilidades actuales y futuras podrán ser del orden siguiente:

Disponibilidades actuales (1946) ... ..	15,90 mill. kw.-h.
» probables ... ..	113,20 » »
» posibles ... ..	35,00 » »
	164,10 mill. kw.-h.

El rendimiento de la cuenca en la parte española asciende solamente al 8,6 por 100.

Los embalses construidos y en proyecto son del orden siguiente:

	Nú- mero	Capa- cidad Hm <sup>3</sup>	Disponibili- dades útiles mill. kw.-h.
Embalses construidos ... ..	2	23,50	—
» probables... ..	5	1.961,53	280,70
» posibles ... ..	6	418,60	37,48
	13	2.403,73	318,18

Todos los embalses pertenecen al Estado, incluyendo el de Proserpina, propiamente de abastecimiento. En el informe de O. P. se han considerado como de valor hidroeléctrico cuatro con 1.433 Hm<sup>3</sup>. El hiperembalse de Cijara excede en unos 690 Hm<sup>3</sup> su capacidad a su aportación anual media, lo que representa unos 118 mill. kw.-h.

### CUENCA DEL GUADALQUIVIR

Esta cuenca, que se extiende a 11 provincias, comprendiendo toda Andalucía, es de 57.065 km<sup>2</sup>, con un recorrido de 680,4 km. el río principal, lo que hace que se clasifique en tercer lugar de los ríos de España con relación a su cuenca, y el cuarto con relación a su recorrido.

Su pendiente media es de 1,07 por mil desde el arroyo Sauco al mar, con un tramo de aceptable pendiente hasta el río Guadalbullón del 2,61 por mil, baja hasta 0,7 entre éste y el Carbones y se reduce a 0,13 en los últimos 170 kilómetros.

La precipitación media de esta cuenca es de 575 mm., y la aportación del río al mar, en año medio, de 7.190 Hm<sup>3</sup>; de ellos corresponden 1.158 Hm<sup>3</sup> al río Genil.

Las superficies de cuenca, disponibilidades integrales en 1946 en el río principal y afluentes, son:

R Í O S	Cuenca km <sup>2</sup>	Disponibili- dad integral mill. kw.-h.	Disponibili- dad 1946 mill. kw.-h.
Guadiana Menor ... ..	7.294	593,00	8.521
Guadalquivir hasta río Gua- dalimar ... ..	2.650	538,46	9.578
Guadalimar... ..	5.198	530,60	13.306
Guadalbullón ... ..	1.132	101,38	8.089
Rumblar ... ..	936	60,10	—
Jándula... ..	2.496	110,60	57.400
Guadalquivir (entre Guada- limar y Jándula) ... ..	616	325,22	29.965
Salado .. ..	667	17,18	—
Suma y sigue ...	20.989	2.276,54	126.859











R Í O S	Cuenca km <sup>2</sup>	Disponibili- dades inte- grales mill. kw.-h.	Disponibili- dades 1946 mill. kw.-h.
Suma anterior ... ..	20.989	2.276,54	126.859
Yeguas ... ..	872	54,70	—
Salado-Porcuna... ..	843	44,10	—
Guadalmellato ... ..	1.388	103,98	—
Guadajoz... ..	2.388	180,14	4.210
Guadiato... ..	1.608	112,88	—
Guadalquivir, entre Jándula y Bembézar ... ..	2.433	794,80	64.774
Bembézar... ..	1.914	212,24	—
Genil... ..	8.642	1.484,46	73.701
Guadalquivir, entre Bembé- zar y Genil ... ..	370	28,20	—
Carbones... ..	1.776	115,40	—
Ribera de Huezna... ..	781	64,96	0.250
Viar... ..	1.814	178,00	—
Ribera Huelva... ..	1.905	238,10	30.315
Guadaira ... ..	1.282	39,20	—
Guadalquivir (resto) ... ..	8.060	541,82	28.372
	57.065	6.469,64	328.481

Las disponibilidades prácticas de la cuenca del Guadalquivir, podemos aceptarlas del orden siguiente:

Disponibilidades actuales (1946)...	328,48 mill. kw.-h.
» probables ... ..	636,52 » »
» posibles... ..	279,10 » »
	1.244,10 mill. kw.-h.

Los embalses construídos y en proyecto, con sus disponibilidades útiles a embalse lleno, son las siguientes:

	Nú- mero	Capacidad Hm <sup>3</sup>	Disponibili- dades útiles mill. kw.-h.
Embalses construídos... ..	9	1.429,5	767,5
» probables ... ..	12	2.407,5	1.309,8
» posibles... ..	7	175,0	47,0
	28	4.012,0	2.143,3

De los 28 pantanos, uno en contrucción (La Mí-nilla, en la Ribera de Huelva, 60,5 Hm<sup>3</sup>), correspon-den al abastecimiento de aguas de Sevilla y el resto corresponde al Estado, menos el de Cala, de 60 Hm<sup>3</sup>, que es propiedad de la Compañía Sevillana de Electri-cidad.

En el informe de O. P. se tienen en cuenta nueve embalses con 1.654 Hm<sup>3</sup> de capacidad como valor hi-droeléctrico.

Los embalses hiperanuales incluídos, son diez: tres construídos (Tranco, Rumbler y Jándula) y siete pro-bables. La capacidad en exceso es de 797 Hm<sup>3</sup>, y su posibilidad 515,8 mill. kw.-h.

## ZONA DEL SUR Y DEL SUDOESTE DE ESPAÑA

Se comprenden dentro de esta zona las cuencas si-tuadas entre el Guadiana y el Guadalquivir, por un lado, y, por otro, las comprendidas entre el Guadal-quivir y el Segura, con una superficie total de 32.101 kilómetros cuadrados.

De los nueve ríos principales de la zona, los tres más importantes, hidroeléctricamente, son el Guadia-ro, el Guadalhorce y el Guadalfeo o Cadiar, con una pendiente media, prescindiendo de su primera zona o nacimiento, de 7,6-6,44 y 16,0 por mil, respectiva-mente, y con aportaciones al mar de 599 Hm<sup>3</sup>, 460 y 180 Hm<sup>3</sup>, también respectivamente.

Su riqueza en agua va reduciéndose de Oeste a Este, y el total desagua en el mar, en año medio, unos 4.762 Hm<sup>3</sup>. Su precipitación media, que comienza en 612 mm. en el Odiel, llega a 850 y 1.015 mm., res-pectivamente, en el Guadalete y en el Guadario, para conservarse a 650 mm., en el Guadalhorce, Vélez y Guadalfeo y desciende a 366 en el Almanzora. Su precipitación media es de 560 mm.

Sus cuencas, disponibilidades integrales y disponi-bilidades en 1946, con del orden siguiente:

R Í O S	Cuencas km <sup>2</sup>	Disponibili- dades inte- grales mill. kw.-h.	Disponibili- dades 1946 mill. kw.-h.
Odiel... ..	2.316	168,54	—
Tinto ... ..	1.584	94,26	—
Guadalete ... ..	3.405	722,34	0,673
Guadiaro... ..	1.458	454,78	73,235
Guadalhorce ... ..	3.098	364,96	45,384
Vélez... ..	640	66,90	0,330
Guadalfeo ... ..	1.264	376,84	53,163
Nacimiento ... ..	2.239	284,84	0,640
Almanzora ... ..	2.506	249,08	0,940
Ríos secundarios ... ..	5.680	196,64	9,454
Resto de cuencas ... ..	7.911	76,40	—
	32.101	3.055,58	183,819

Entre los ríos secundarios están incluídos el Pie-dras (Huelva), Barbate (Cádiz), Grande, Morales y Aguas (Almería) y hasta 14 más.



Las disponibilidades prácticas de esta zona podemos fijarlas así:

Disponibilidades actuales (1946)...	183,82 mill. kw.-h.
» probables ...	44,80 »
» posibles...	37,00 »
	265,62 mill. kw.-h.

El rendimiento de la zona, con 3.055,58 millones de kw.-h. de disponibilidades integrales es del 8,4 %.

Los embalses construídos y proyectados con sus capacidades y disponibilidades, a embalse lleno, son:

	Número	Capacidad Hm <sup>3</sup>	Disponibilidades útiles mill. kw.-h.
Embalses construídos...	2	171,0	44,88
» probables ...	2	324,0	54,48
» posibles ...	1	50,0	12,00
	5	545,0	111,36

Todos pertenecen al Estado. El informe de Obras Públicas incluye sólo el del Chorro, en el Guadalhorce, con una capacidad de 88 Hm<sup>3</sup>. En este estudio hemos admitido una capacidad de 95 Hm<sup>3</sup>, teniendo en cuenta el proyectado recrecimiento del embalse.

#### CUENCA DEL SEGURA

La superficie total de la cuenca, asciende a 15.974 kilómetros cuadrados, y el recorrido del río principal es de 225,1 km. ocupa el octavo lugar entre los ríos españoles.

Su pendiente media es de 4,4 por mil, contando desde el río Madera al mar, con pendientes parciales de 6,75 por mil hasta el río Mundo, de 3,72 entre el Mundo y Murcia y de 0,45 por mil desde Murcia al mar.

Su precipitación es muy reducida, de 450 mm. como media, con un desagüe en el mar de 411 Hm<sup>3</sup>, descontando el agua absorbida por los riegos: de esa cantidad corresponde al río Mundo 189 Hm<sup>3</sup>.

La superficie de las cuencas de los afluentes y río principal, sus disponibilidades integrales y las de 1946 son del orden siguiente:

R Í O S	Cuencas km <sup>2</sup>	Disponibilidades integrales mill. kw.-h.	Disponibilidades 1946 mill. kw.-h.
Segura hasta Taibilla (I)...	1.254	449,48	0,170
Taibilla...	560	159,66	0,036
Segura (II) ...	880	402,60	0,108
Mundo ...	2.866	261,22	11,668
Segura (III) ...	73	100,00	—
Maratalla ...	601	31,80	—
Segura (IV) ...	484	178,32	9,030
Quipar ...	784	49,82	0,400
Segura (V)...	227	85,00	48,307
Ribera Pila...	1.341	24,38	—
Segura (VI)...	1.136	140,06	18,173
Mula...	768	48,28	0,124
Segura (VII) ...	304	42,20	0,670
Guadalentín ...	3.572	159,70	0,160
Segura (VIII) ...	1.124	15,16	—
	15.974	2.147,68	88,846

Las secciones numeradas de I al VIII del río principal corresponde a las zonas comprendidas entre los afluentes anterior y posterior de la relación.

Las disponibilidades prácticas de la cuenca, teniendo en cuenta los saltos de la conducción de agua del Taibilla, y los de pie de presa son:

Disponibilidades actuales ...	88,85 mill. kw.-h.
» probables ...	120,00 »
» posibles...	103,90 »
	312,75 mill. kw.-h.

El rendimiento de la cuenca es de 14,5 %.

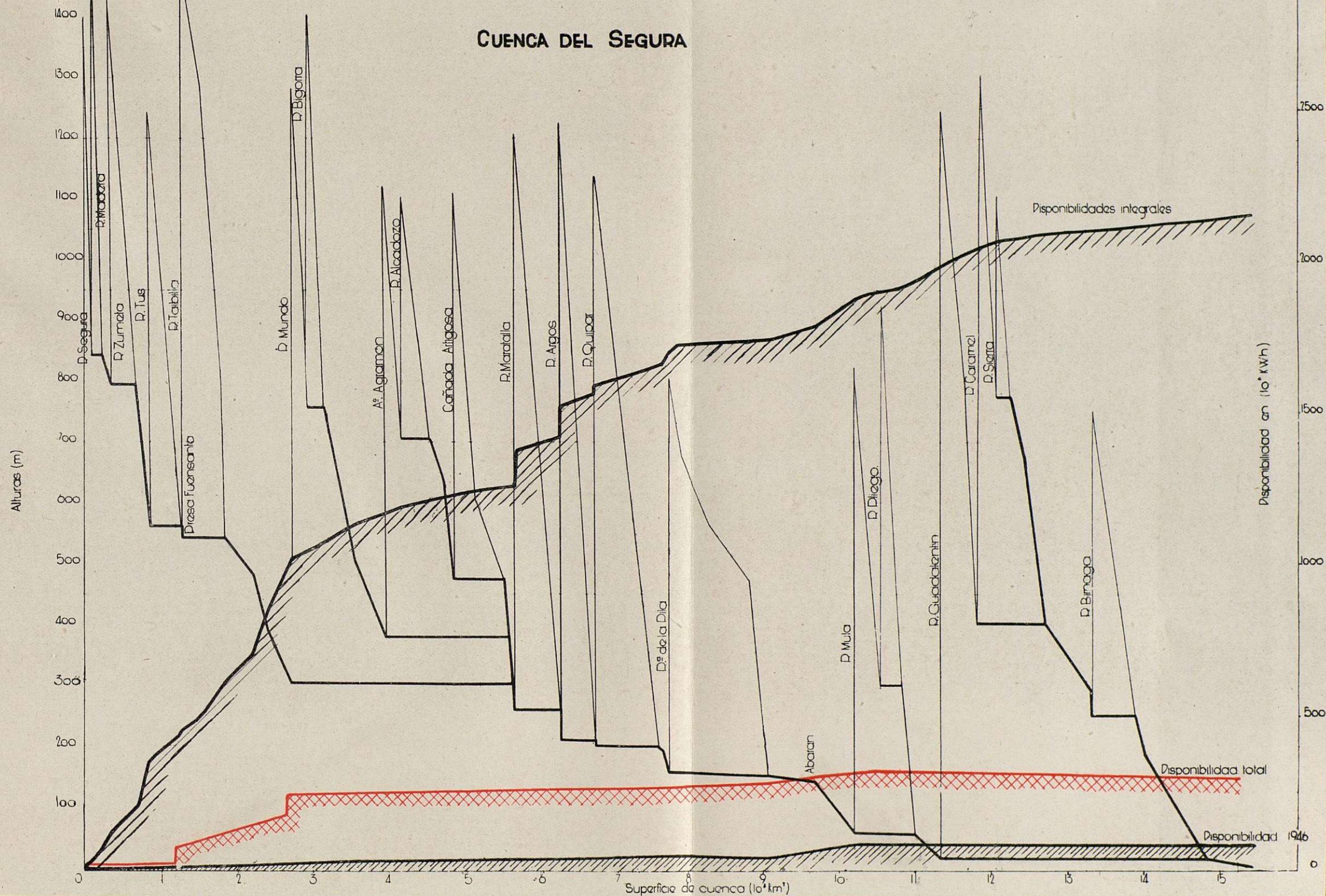
Los embalses construídos y en proyecto, con sus capacidades y disponibilidades, son:

	Número	Capacidad Hm <sup>3</sup>	Disponibilidades útiles mill. kw.-h.
Embalses construídos...	6	369,55	203,19
» probables ...	1	461,70	240,10
» posibles...	1	39,00	3,12
	8	870,25	446,41

Los ocho embalses anteriores construídos o en proyecto corresponden al Estado. Se han tenido en cuenta en el informe de Obras Públicas solamente cuatro, de valor hidroeléctrico, con 800 Hm<sup>3</sup> de capacidad.



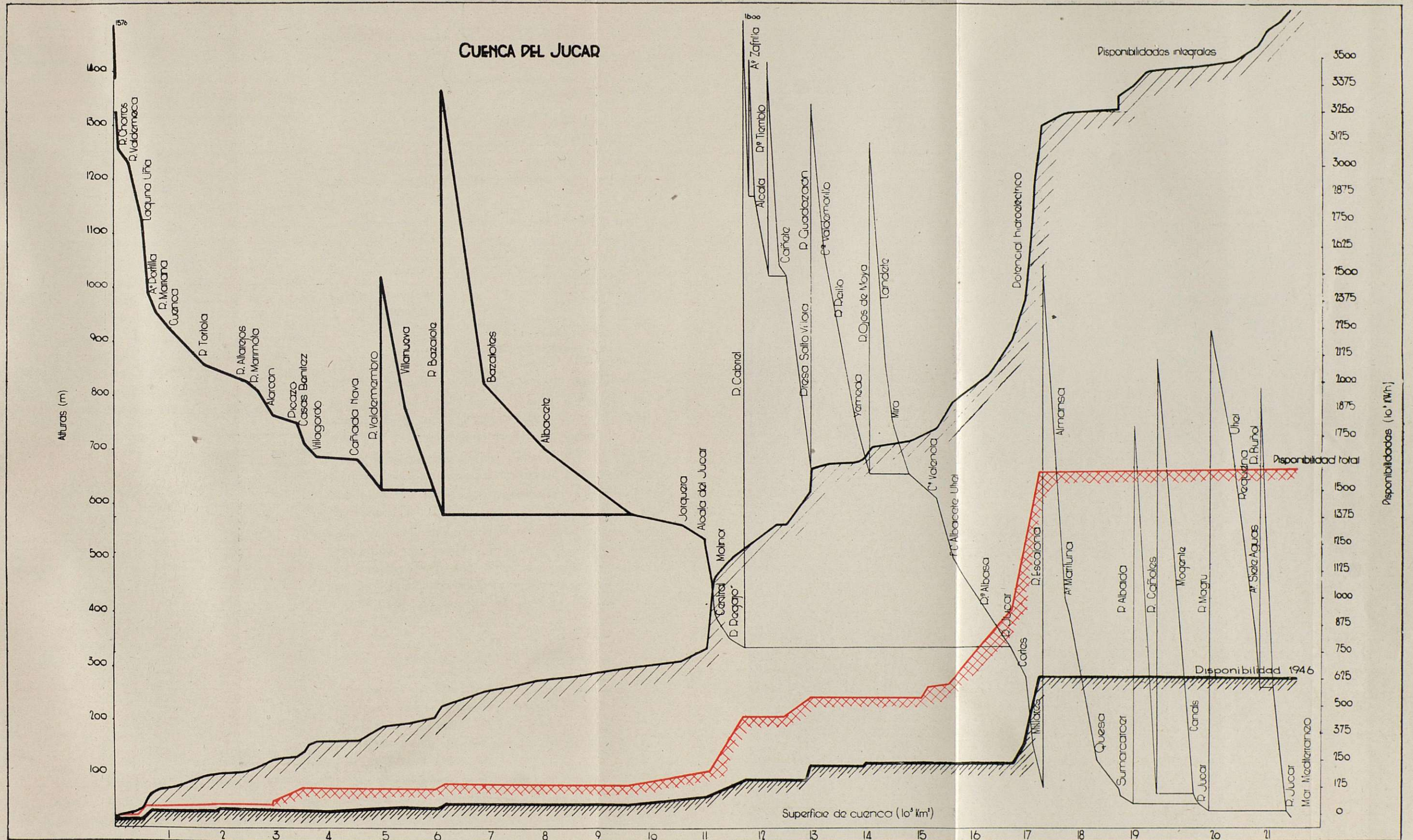
# CUENCA DEL SEGURA

















## ZONA DE LEVANTE (JÚCAR)

Comprende la zona entre el Segura y el Ebro, correspondiente a la Confederación del Júcar, con una superficie total de 43.067 Km<sup>2</sup>.

El río principal de la zona es el Júcar, con 21.784 kilómetros cuadrados, y un recorrido de 554,9 kilómetros, que le hace catalogar como el sexto de los ríos españoles.

Es el río que mejor se caracteriza en cuatro tramos, dos industriales, el primero y tercero, y dos de riegos de meseta y huerta. Su pendiente media es de 2,3 por mil desde el río Chorros al mar, con las pendientes sucesivas siguientes: 5,5 por mil, en 49,94 kilómetros; 1,59 por mil, en 285,8 km.; 4,4 por mil, en 101,6 km., y 0,74 por mil, en 83,9 km.

La precipitación media de la zona es de 551 mm. Corresponde esta misma precipitación al Júcar, 664 al Serpis y 334 al Vinalopó.

La aportación de toda la zona al mar, descontando los riegos, es del orden de 3.664 Hm<sup>3</sup>, de los que corresponden 2.158 Hm<sup>3</sup> al Júcar y 466 al Turia.

Las cuencas parciales y totales, disponibilidades integrales y las de 1946 son del orden siguiente:

R Í O S	Cuencas km <sup>2</sup>	Disponibi- lidades inte- grales mill. kw.-h.	Disponibi- lidades 1946 mill. kw.-h.
Júcar (I) ... ..	4.942	423,94	54,547
Valdemembro ... ..	962	38,82	—
Júcar (II) ... ..	166	52,70	3,797
Bazalote ... ..	3.520	179,00	—
Júcar (III) ... ..	2.037	542,60	113,574
Cabriel ... ..	4.954	980,70	76,608
Júcar (IV) ... ..	576	1.008,60	487,246
Escalona ... ..	1.400	37,84	—
Júcar (V) ... ..	314	119,80	1,770
Albaida ... ..	1.194	52,30	0,332
Júcar (VI) ... ..	139	39,86	0,900
Magro ... ..	1.424	318,22	0,095
Júcar (VII) ... ..	158	51,50	0,090
Cuenca-Júcar ... ..	21.786	3.845,88	738,759
Turia ... ..	6.767	883,96	50,484
Mijares ... ..	4.077	667,78	54,257
Vinalopó ... ..	1.923	74,68	0,400
Serpis ... ..	790	92,42	5,135
Palancia ... ..	1.035	115,40	0,810
Ríos secundarios ... ..	6.689	227,33	0,600
	43.067	5.907,45	850,445

Entre los ríos secundarios se incluyen los de Monegre, Amadorio, Algar, Gargos, Girona, Gallinera, Veo y Denia, en general con escasa precipitación y caudal.

Los aprovechamientos actuales y futuros se pueden aceptar como sigue:

Disponibilidades actuales (1946) ... ..	850,44	mill. kw.-h.
» probables ... ..	851,00	» »
» posibles ... ..	305,43	» »
	2.006,87	mill. kw.-h.

Con arreglo a las disponibilidades integrales y prácticas, el coeficiente de rendimiento se eleva a 33,8 %.

Los embalses construídos o en proyecto, su capacidad y sus disponibilidades a embalse llenó, son del orden siguiente:

	Nú- mero	Capacidad Hm <sup>3</sup>	Disponibi- lidades mill. kw.-h.
Embalses construídos ... ..	9	855,2	1.135,35
» probables ... ..	15	1.310,2	1.294,42
» posibles ... ..	19	671,8	783,12
	43	2.837,2	3.212,89

Todos los embalses incluídos son de riego y construídos o proyectados por el Estado, incluyendo en ellos 11 en el Júcar, de 2.072,7 Hm<sup>3</sup>, 7 en el Turia con 534,8 y 10 en el Mijares, con 147,3 Hm<sup>3</sup>.

Son hiperembalses los del Alarcón, Pajaroncillo y Contreras, con un exceso de capacidad sobre la aportación de 790,5 Hm<sup>3</sup>, que supone una disponibilidad de 776,6 mill. kw.-h.

En el citado informe de Obras Públicas sobre las disponibilidades posibles debidas a la regulación en los embalses del Estado, no se han tenido en cuenta las de la Confederación, porque el servicio correspondiente tiene en proyecto un estudio completo del mismo.

## ZONA DEL PIRINEO ORIENTAL

Incluimos en esta zona la comprendida entre la cuenca del Ebro a la frontera francesa o Pirineo Oriental, con una superficie de 16.318 km<sup>2</sup>, con una precipitación media de 745 mm. y un desagüe en el mar de 2.597,4 Hm<sup>3</sup>.

Los dos ríos más importantes de la zona son el Llobregat y el Ter: el primero, con 5.076 km<sup>2</sup> y 690 mm., de precipitación, tiene un recorrido de



160,1 km., una pendiente de 12,5 por mil y un desagüe al mar de 583,7 Hm<sup>3</sup> en año medio.

El Ter tiene una superficie de cuenca vertiente de 2.228 km<sup>2</sup> con una precipitación media de 1.098 mm., un recorrido de 207,1 km., una pendiente media de 11,5 por mil y un desagüe al mar, en año medio, de 814,4 Hm<sup>3</sup>.

R Í O S	Cuencas km <sup>2</sup>	Disponibili- dades inte- gcales mill. kw.-h.	Disponibili- dades 1946 mill. kw.-h.
Francolí ... ..	857	32,13	0,070
Gaya ... ..	360	20,26	0,290
Foix ... ..	381	10,11	—
Llobregat... ..	5.076	550,38	21,034
Besós ... ..	988	33,62	0,306
Tordera ... ..	856	60,98	3,860
Ter ... ..	2.828	1.099,36	82,378
Fluviá ... ..	1.052	224,08	7,935
Muga ... ..	595	99,68	2,899
Secundarios ... ..	3.325	62,64	0,100
	16.318	2.193,24	118,872

Entre los ríos secundarios incluimos los siguientes: Ruidons, Vendrell, Ridauri y Daro, así como otros de muy pequeña importancia.

El resumen de disponibilidades prácticas es el siguiente:

Disponibilidades actuales (1946) ... ..	118,87 mill. kw.-h.
» probables ... ..	82,00 » »
» posibles ... ..	277,24 » »
	478,11 mill. kw.-h.

El rendimiento de la zona es de 21,8 %.

Los embalses construídos y en proyecto en la zona del Pirineo Oriental con sus capacidades y disponibilidades útiles, a embalse lleno, son los siguientes:

Embalses construídos ... ..	2	9,75	0,58
» probables ... ..	4	323,30	151,60
» posibles ... ..	11	256,78	101,16
	17	589,83	253,34

Todos los embalses incluídos pertenecen al Estado. En el informe de Obras Públicas tantas veces citado,

no se incluyen como de valor hidroeléctrico más que tres, con 203,5 Hm<sup>3</sup> de capacidad.

## ZONA DE VERTIENTE FRANCESA

Comprendemos dentro de esta zona el río Carona, en el Valle de Arán, con 535 km<sup>2</sup>, el Arnegui, al Norte de Roncesvalles, afluente del río Nive, que en la parte española tiene una cuenca de 39 km<sup>2</sup>; los arroyos de Aritzacum y Urrizate, afluentes también del Nive, con 43 km<sup>2</sup> la cabecera del río Nive Baignory, en los Alduides, con 23,5 km<sup>2</sup> y el Ugarona u Olavidea, en Urdax, afluente del río Nivelle, con 62 km<sup>2</sup>. En total, la cuenca considerada alcanza la cifra de 702 km<sup>2</sup>.

De toda la zona, el río más importante es el Garona, en el Valle de Arán, que tiene una pendiente de 22,0 por mil, con una precipitación de 1.074 milímetros y una aportación total en la frontera de unos 402 Hm<sup>3</sup> en año medio.

Las demás cuencas, tienen una precipitación del orden de 1.800 mm. y una aportación total en la frontera de 141,9 Hm<sup>3</sup>.

Las cuencas disponibles integrales de 1946, son las siguientes:

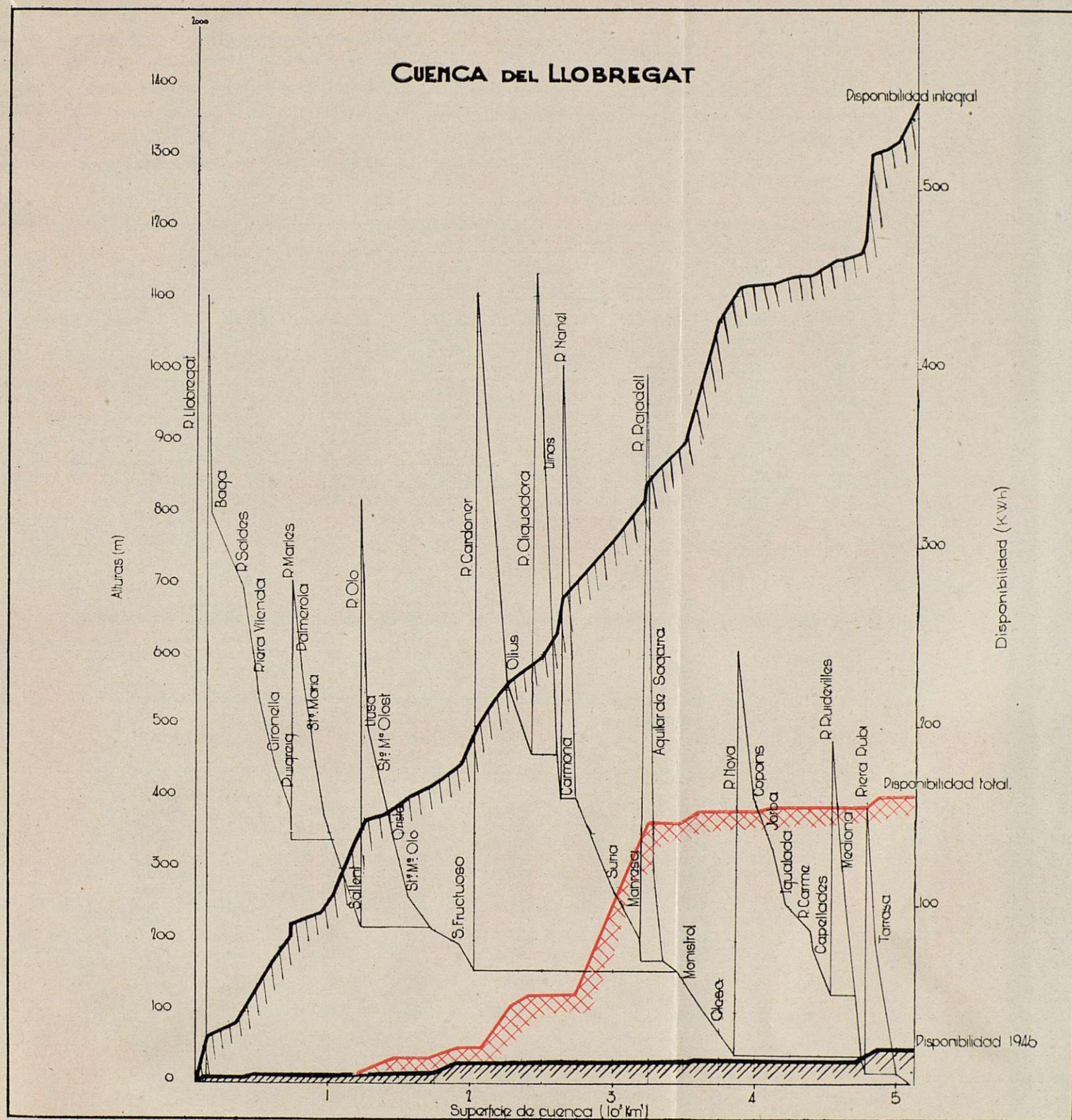
	Cuen- cas	Disponibi- lidades integrales mill. kw.-h.	Disponibili- dades 1946 mill. kw.-h.
Garona ... ..	535	625,74	31,265
Arnegui ... ..	39	20,10	8,744
Ugarona ... ..	62	21,06	0,165
Otros ... ..	66	22,60	—
	702	689,50	40,174

Las disponibilidades de estas cuencas corresponden en el futuro exclusivamente al Valle de Arán y son del orden siguiente:

Disponibilidades actuales (1946) ... ..	40,17 mill. kw.-h.
» probables ... ..	406,70 » »
» posibles ... ..	92,00 » »
	538,87 mill. kw.-h.

El rendimiento de toda la zona resulta igual al 78 por 100 y contando solamente el Valle de Arán el 86 por 100.











En cuanto a los embalses de esta zona, exclusivamente también del Valle de Arán, se están recreciendo en la cabecera del Garona varios lagos o Ibones para su inmediata utilización: su número en construcción y en proyecto es superior a 28 (aunque lo consideramos como una unidad en el resumen) y representa una capacidad de 49,45 Hm<sup>3</sup>, con unas disponibilidades, a embalse lleno, de 127,0 mill. de kw.-h.,

y se consideran todos como de probable construcción.

## RESUMEN

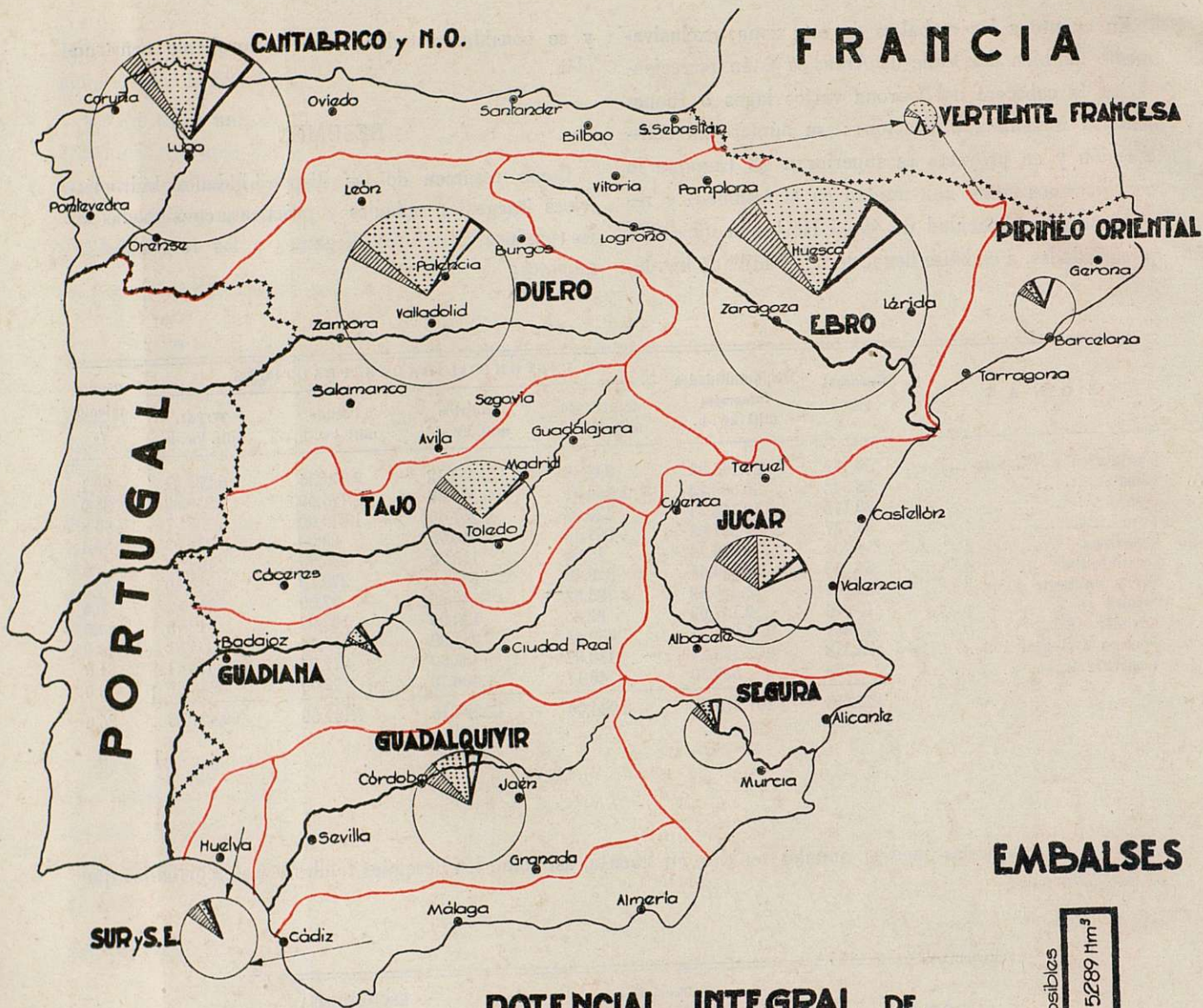
Como resumen de las disponibilidades hidroeléctricas integrales, actuales y prácticas, consignadas en las páginas anteriores, llegamos a los resultados siguientes:

Z O N A S	Cuencas km <sup>2</sup>	Disponibilidades integrales mill kw.-h.	DISPONIBILIDADES PRACTICAS				Rendi- miento %
			Actual 1946 mill. kw.-h.	Probable mill. kw.-h.	Posible mill. kw.-h.	TOTAL mill. kw.-h.	
Cantábrico y Noroeste ...	54.715	27.145,38	837,45	3.351,12	2.095,34	6.283,91	23,1
Ebro ...	82.542	30.646,24	1.668,81	5.396,38	2.775,49	9.840,68	31,9
Duero ...	78.194	19.158,33	620,08	4.207,49	1.079,00	5.906,57	30,8
Tajo ...	56.737	7.951,68	291,13	2.014,95	80,00	2.386,08	30,1
Guadiana ...	54.708	1.908,73	15,90	113,20	35,00	164,10	8,6
Guadalquivir ...	57.065	6.469,64	328,48	636,52	279,10	1.244,10	19,3
Sur y Sudoeste ...	32.101	3.055,58	183,82	44,80	37,00	265,62	8,4
Segura ...	15.974	2.147,68	88,85	120,00	103,90	312,75	14,5
Levante (Júcar) ...	43.067	5.907,75	850,44	851,00	305,43	2.006,87	33,8
Pirineo Oriental ...	16.318	2.193,24	118,87	82,00	277,24	478,11	21,8
Vertiente francesa ...	702	689,50	40,17	406,70	92,00	538,87	78,0
	492.113	107.273,75	5.044,00	17.224,16	7.159,50	29.427,66	26,5

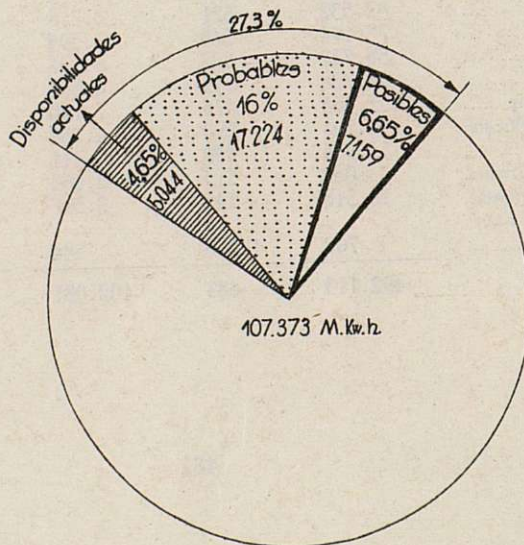
Las precipitaciones medias anuales tenidas en cuenta, así como los desagües totales y las escorrentías que se deducen son:

Z O N A S	Cuencas km <sup>2</sup>	Precipita- ción media mm.	Desagüe anual Hm <sup>3</sup>	ESCORRENTIA	
				mm.	%.
Cantábrico Nor- oeste ...	54.715	1.380	40.315	740	0,535
Ebro ...	82.532	621	20.378	247	0,398
Duero ...	78.194	640	13.595	174	0,272
Tajo ...	56.737	628	5.957	105	0,167
Guadiana ...	54.708	515	2.668	49	0,095
Guadalquivir ...	57.065	575	7.190	126	0,219
Sur y Sudoeste.	32.101	590	4.762	148	0,250
Segura ...	15.974	450	411	2,6	0,006
Levante (Júcar).	43.067	515	3.664	8,5	0,016
Pirineo Oriental.	16.318	745	2.597	159	0,214
Vertiente fran cesa ...	702	1.250	544	775	0,620
	492.113	683	102.081	208	0,304

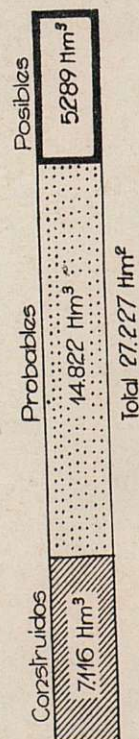




## POTENCIAL INTEGRAL DE ESPAÑA



## EMBALSES





Por último, el resumen de los embalses construídos o en proyecto, es el siguiente:

	CONSTRUIDOS		PROBABLES		POSIBLES		TOTALES		
	Nú- mero	Capacidad Hm <sup>3</sup>	Nú- mero	Capacidad Hm <sup>3</sup>	Nú- mero	Capacidad Hm <sup>3</sup>	Nú- mero	Capacidad Hm <sup>3</sup>	Disponibilidades útiles
Cantábrico y Noroeste ... ..	6	210,7	12	1.537,0	15	896,9	33	2.644,6	1.891,20
Ebro ... ..	20	1.374,4	22	1.347,3	32	1.430,2	74	4.125,4	2.638,50
Duero ... ..	9	2.225,0	6	816,0	9	1.124,8	24	4.165,8	2.566,78
Tajo ... ..	8	447,8	12	4.283,8	7	253,0	27	4.984,6	1.370,60
Guadiana ... ..	2	23,5	5	1.961,6	6	418,6	13	2.403,7	318,18
Guadalquivir ... ..	9	1.429,5	12	2.407,5	7	175,0	28	4.012,0	2.124,30
Sur y Sudoeste ... ..	2	171,0	2	324,0	1	50,0	5	545,0	111,36
Segura ... ..	6	369,5	1	461,7	1	39,0	8	870,2	446,31
Levante (Júcar ... ..	9	855,2	15	1.310,2	19	671,8	43	2.837,2	3.212,89
Pirineo Oriental ... ..	2	9,7	4	323,3	11	256,8	17	589,8	253,34
Vertiente francesa ... ..	—	—	1	49,4	—	—	1	49,4	538,87
	73	7.116,3	92	14.822,3	108	5.289,1	273	27.227,7	15.472,33
Hiperembalses ... ..	6	1.261,0	10	2.013,0	1	21,5	17	3.295,5	1.830,20
		5.855,3		12.809,3		5.267,6		23.932,2	13.642,13

De los totales hemos restado las capacidades suplementarias en los hiperembalses, indicadas en cada cuenca, de modo que, en definitiva, quedan las capacidades totales en años medios, así como sus disponibilidades útiles.

#### JUSTIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS

Como comprobación de las disponibilidades integrales calculadas podemos deducir el orden de ellas partiendo de la precipitación media de España, de su esorrentía y de su altitud.

Del estudio tantas veces citado por el Sr. G. Quijano «Avance...», copiamos las áreas hipsométricas de España, que son las siguientes:

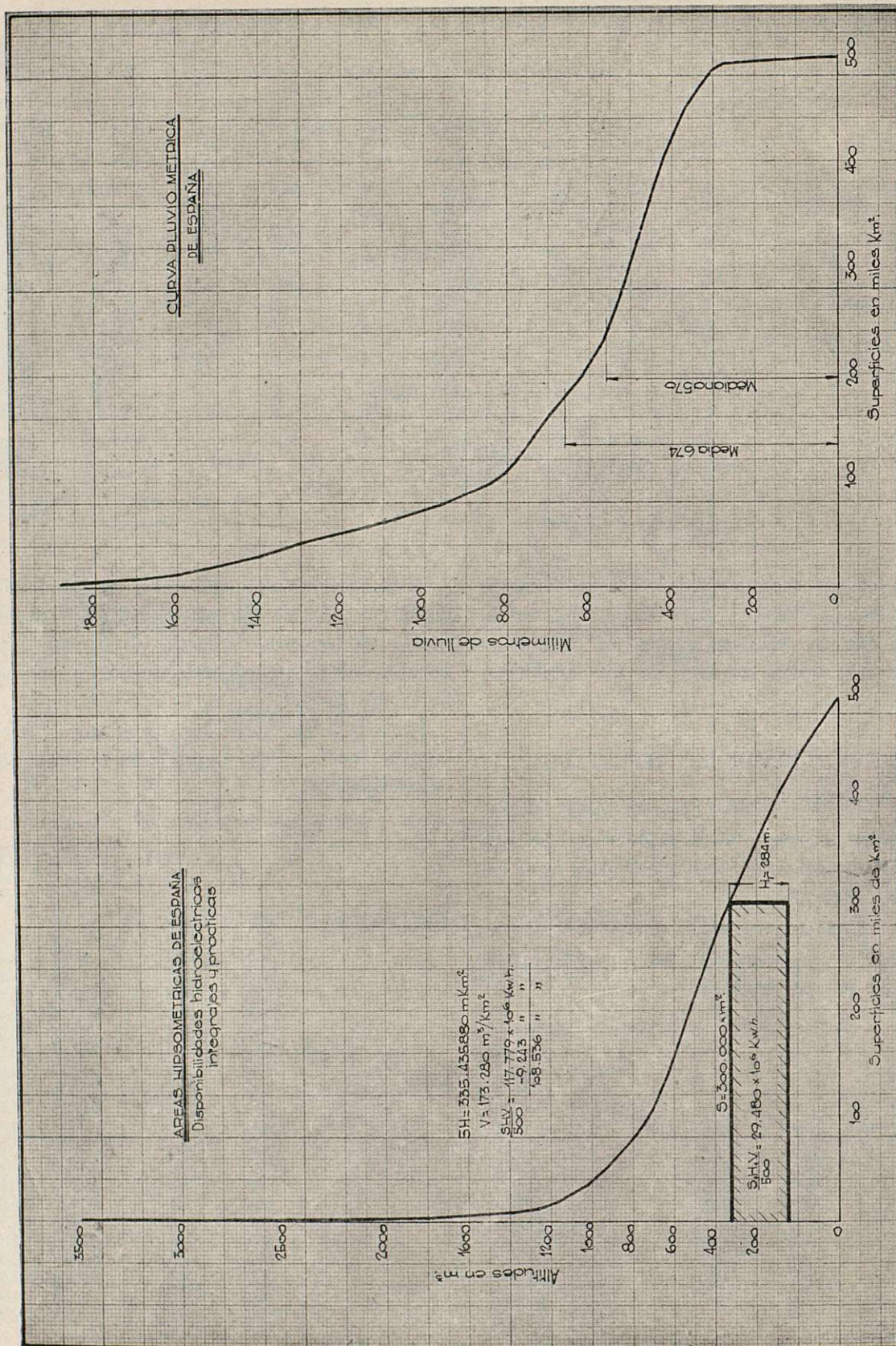
				Parciales km <sup>2</sup>	Acumula- das km <sup>2</sup>
Superficie	entre	3.480	y 3.300 m.	122	122
»	»	3.000	2.500	1.259	1.381
»	»	2.500	2.000	3.045	4.426
»	»	2.000	1.600	7.482	11.908
»	»	1.600	1.200	29.662	41.570
»	»	1.200	1.000	43.406	84.976
»	»	1.000	800	86.196	171.172
»	»	800	600	104.321	275.493
»	»	600	400	85.691	361.184
»	»	400	200	77.166	438.350
»	»	200	—	53.897	492.247
				492.247	

De la relación anterior se deduce que la altura media es del orden de 648 metros, y destacan al mismo tiempo las pequeñas diferencias en la superficie de España, deducidas en nuestro estudio y en el del señor G. Quijano.

También el Sr. G. Quijano, en su mapa pluviométrico de España (1946) señala la curva pluviométrica media siguiente:

				Áreas parciales km <sup>2</sup>	Áreas acu- muladas km <sup>2</sup>
Precipitación	entre	2.300	y 2.200 mm.	48	48
»	»	2.200	2.100	337	385
»	»	2.100	2.000	1.058	1.443
»	»	2.000	1.900	1.396	2.839
»	»	1.900	1.800	2.469	5.308
»	»	1.800	1.700	4.170	9.478
»	»	1.700	1.600	3.977	13.455
»	»	1.600	1.500	6.695	20.150
»	»	1.500	1.400	9.438	29.588
»	»	1.400	1.300	13.631	43.219
»	»	1.300	1.200	11.434	54.653
»	»	1.200	1.100	9.237	63.890
»	»	1.100	1.000	10.072	73.962
»	»	1.000	900	15.026	88.988
»	»	900	800	20.704	109.692
»	»	800	700	36.351	146.043
»	»	700	600	71.865	217.908
»	»	600	500	94.473	312.381
»	»	500	400	112.578	424.959
»	»	400	300	60.330	485.289
»	»	300	200	6.528	491.817
»	»	200	100	428	492.245
				492.245	







Estas precipitaciones dan una media de 674 milímetros para España con una mediana de 570 mm. como lluvia en año normal. Como media ponderada hemos deducido en nuestro estudio la cifra de 683 milímetros, que representa respecto de la primera, una variación de 1,3 por 100.

Admitiendo, como hemos deducido, una escorrentía de 0,304, que la precipitación media de España sea de 570 mm., o sea la mediana antes mencionada y teniendo en cuenta la superficie del área hipsométrica, así como la utilización de un kw.-h. cada m<sup>3</sup>, y 500 metros de desnivel, obtenemos, con carácter aproximado, las disponibilidades integrales siguientes:

$$\frac{335.435.880}{500} \times 0,570 \times 0,304 = 117.779 \text{ mill. kw.-h.}$$

Si se tiene en cuenta que los ríos Lima, Duero y Tajo discurren en parte por Portugal, entran los distintos ríos a cotas superiores al nivel del mar, la cifra anterior habría de corregirse con la disponibilidad correspondiente a esta diferencia, que podemos aceptar como sigue:

	Cuenca km <sup>2</sup>	Volu- men de Hm <sup>3</sup>	Cota en su entrada en Portugal metros	Disponibi- lidad integral kw.-h.
Río Lima ... ..	1.528	1.530	240	735
» Duero ... ..	78.194	13.595	120	3.280
» Tajo ... ..	58.985	5.257	72	760
» Duero en la zona internacional per- teneciente a Por- tugal ... ..	—	—	—	4.000
» Guadiana en la zona portuguesa...	—	—	—	468
				9.243
Cantidad calculada ... ..				117.779
Disponibilidades integrales de España ... ..				108.536

La cifra anterior se aproxima mucho a la que hemos obtenido en este estudio.

Hemos supuesto en el cálculo anterior que la zona de Andorra y superficies francesas se compensan con la parte de la vertiente española a los ríos franceses.

#### REPRESENTACIÓN VIRTUAL DE LAS DISPONIBILIDADES HIDROELÉCTRICAS INTEGRALES Y PRÁCTICAS DE ESPAÑA

Hemos determinado por cuencas las disponibilidades hidroeléctricas integrales y prácticas en España en año

medio. Sería posible, disponiendo de tiempo, estudiar para cada cuenca las correspondientes a años sucesivos, secos, medio y húmedos, para tener idea, siempre sólo aproximada de las mismas.

Ante la imposibilidad de hacerlo, permítasenos que concretemos las posibilidades integrales en un río virtual en el que pudieran obtener éstas, para darnos cuenta del orden de variaciones que de año medio a seco puedan producirse.

Conocida el área hipsométrica de España, podremos suponer un río que, nacido a 3.480 metros de desagüe en el mar con una cuenca de 492.247 km<sup>2</sup> y una aportación total en año medio, de 102.081 Hm<sup>3</sup>; es decir, un caudal medio de 3.240 m<sup>3</sup> p. s., distribuido de tal forma, que diera una posibilidad integral de 107.273 millones de kw.-h.

Hemos deducido que la capacidad de los embalses construídos y proyectados es, en total, de 27.227,7 hectómetros cúbicos. La capacidad que excede a la aportación media 3.295,5 Hm<sup>3</sup>, con disponibilidades útiles cifradas en 15.472,33 mill. de kw.-h. El salto correspondiente a este embalse para obtener aquella producción será de 284 metros.

Un salto de esta altura, 284 metros, capaz de producir 29.427,66 mill de kw.-h. (posibilidades prácticas de España) representa un caudal medio de 1.665 m<sup>3</sup> p. s., que, con la precipitación media y la escorrentía de España, representa una cuenca de unos 300.000 km<sup>2</sup>: es decir, virtualmente el aprovechamiento equivalente estaría situado entre las cotas 500 y 200 con 284 m. de salto y con un embalse de 27.227,7 Hm<sup>3</sup> de capacidad, de ellos 23.232,2 utilizados en año normal y 3.295,5 en año seco: dada la relación de la capacidad a la aportación, de 0,455, prácticamente la regulación sería completa.

Para comparar los distintos años nos hemos fijado en el decenio 1916-25 para el cual G. Quijano estudia los caudales de los 11 principales ríos de España en su parte próxima al mar o a la frontera; en el decenio se puede tomar, como año normal, el de 1924, y como año seco, el 1921.

Añadiendo a los caudales señalados en el tantas veces citado «Avance...» los del Esla (los del Duero, se han tomado en Toro) y ponderando los mismos teniendo en cuenta los distintos coeficientes que hemos llamado rendimiento (primer cuadro del resumen), hemos obtenido los caudales medios siguientes:



## CONCLUSIONES

De los datos recogidos y calculados en las páginas anteriores podemos deducir como conclusiones:

1.<sup>a</sup> En año normal, teniendo en cuenta las precipitaciones y caudales circulantes en toda España peninsular, las disponibilidades hidroeléctricas integrales son del orden de 107.274 mill. kw.-h.

2.<sup>a</sup> De estas disponibilidades, por el hecho de ser integrales y de aprovechar el desnivel y aportaciones totales, sólo una parte se podrá utilizar prácticamente. Admitimos que esta proporción sea del 26,5 por 100.

3.<sup>a</sup> Estas disponibilidades prácticas, que suponen, en año medio, unos 29.427 mil. kw.-h., se pueden clasificar en un 17,1 por 100 en disponibilidades en 1946; un 58,5 por 100, en disponibilidades probables, y un 24,4 por 100 en disponibilidades posibles.

4.<sup>a</sup> En año seco las disponibilidades integrales pueden considerarse reducidas al 68 por 100, o sea, a 72.946 mill. de kw.-h. y las prácticas al 79 por 100; debida esta diferencia a los hiperembalses, o sea a 23.248 mill. de kw.-h.

5.<sup>a</sup> Los embalses actualmente contruídos representan un volumen de 7.126,3 Hm<sup>3</sup>, de los que corresponden el 17,7 por 100 a la capacidad que excede a la aportación anual respectiva.

6.<sup>a</sup> Por último, se supone que, contando con los embalses probables y posibles, además de los actuales, el número total se eleve a 273, con una capacidad de 27.227,7 Hm<sup>3</sup>, con un exceso de capacidad en los hiperembalses del 12 por 100 y que representan unas disponibilidades útiles, contando con los aprovechamientos posibles y llenos los embalses, de 15.472 millones de kw.-h.

1.<sup>o</sup> de septiembre de 1949.

	Caudal medio m <sup>3</sup> p. s.	Aportacion anual total Hm <sup>3</sup>
Año 1921 ... ..	1.131.1	35.629
» 1924 ... ..	1.746.9	55.027
Media 1926-25 ... ..	1.722.3	54.252

Los caudales mensuales de estos ríos, ponderados como hemos indicado, se han llevado a un gráfico en el que se deduce que en año normal (1924) con 14.430 Hm<sup>3</sup> de embalse se consigue la regulación total del río virtual, y, por lo tanto, que, en año húmedo, hay margen para llenar los hiperembalses. Se deduce también que en el año medio (1916-25) la curva acumulada se acerca a la del año 1924, en los meses de enero, febrero, julio, agosto, septiembre y octubre, es inferior en los meses de marzo, abril, mayo y junio y superior en noviembre y diciembre, como es natural, ya que se trata de un año real y de un año ficticio: la regulación se puede hacer con una capacidad de 11.180 m<sup>3</sup>.

En año seco la aportación es el 68 por 100 del año normal: los hiperembalses deben entrar en funciones en este año con su disponibilidad, que la hemos fijado en 1.830,2 mill. de kw.-h. No parece aventurado el admitir que las disponibilidades mejoran en un 11 por 100 en este año, ya que hemos supuesto que la altura de un salto en que cada metro cúbico representa un kw.-h., es de 500 metros, cuando, con el rendimiento normal, esta altura es de 450 metros.

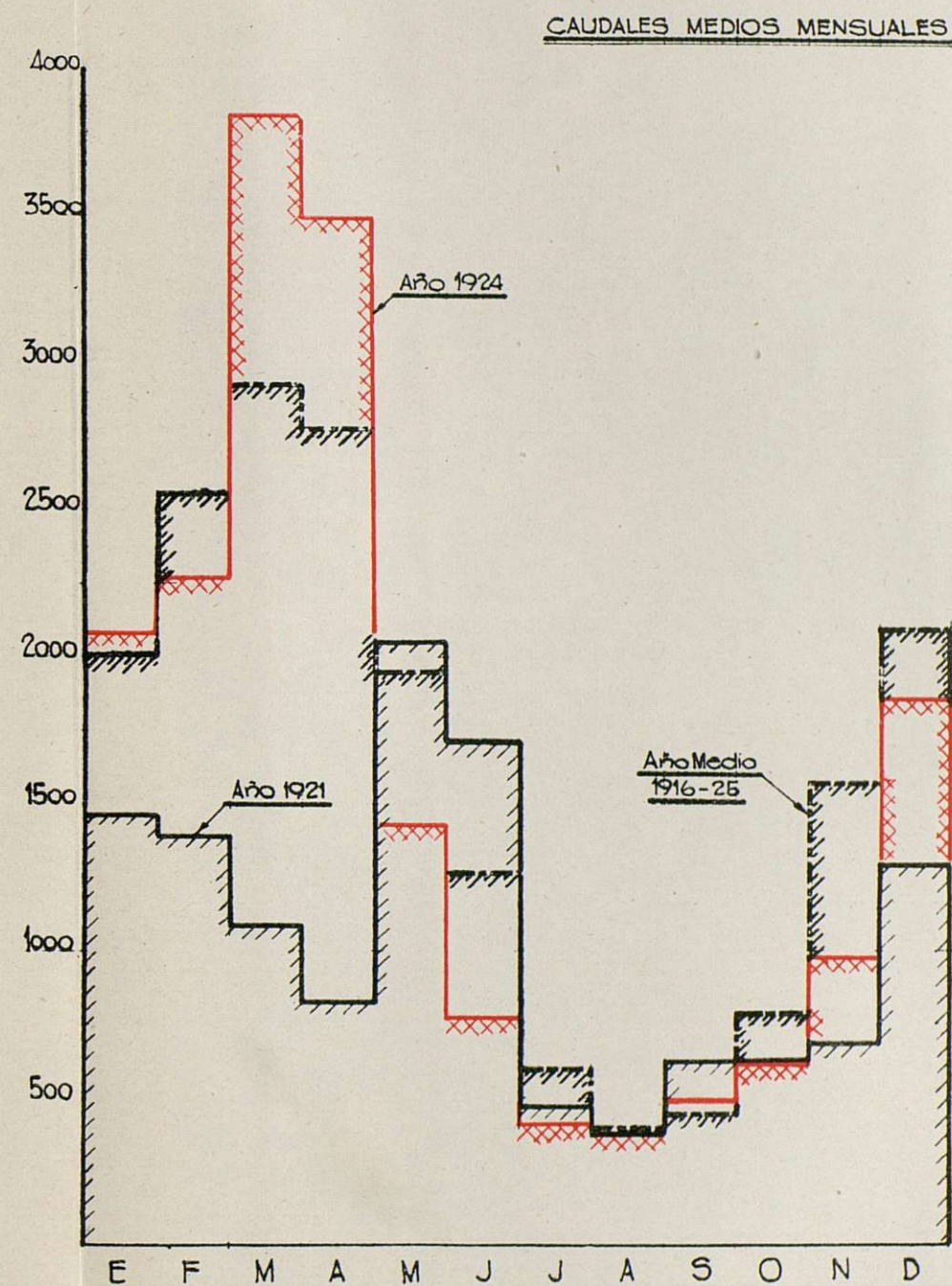
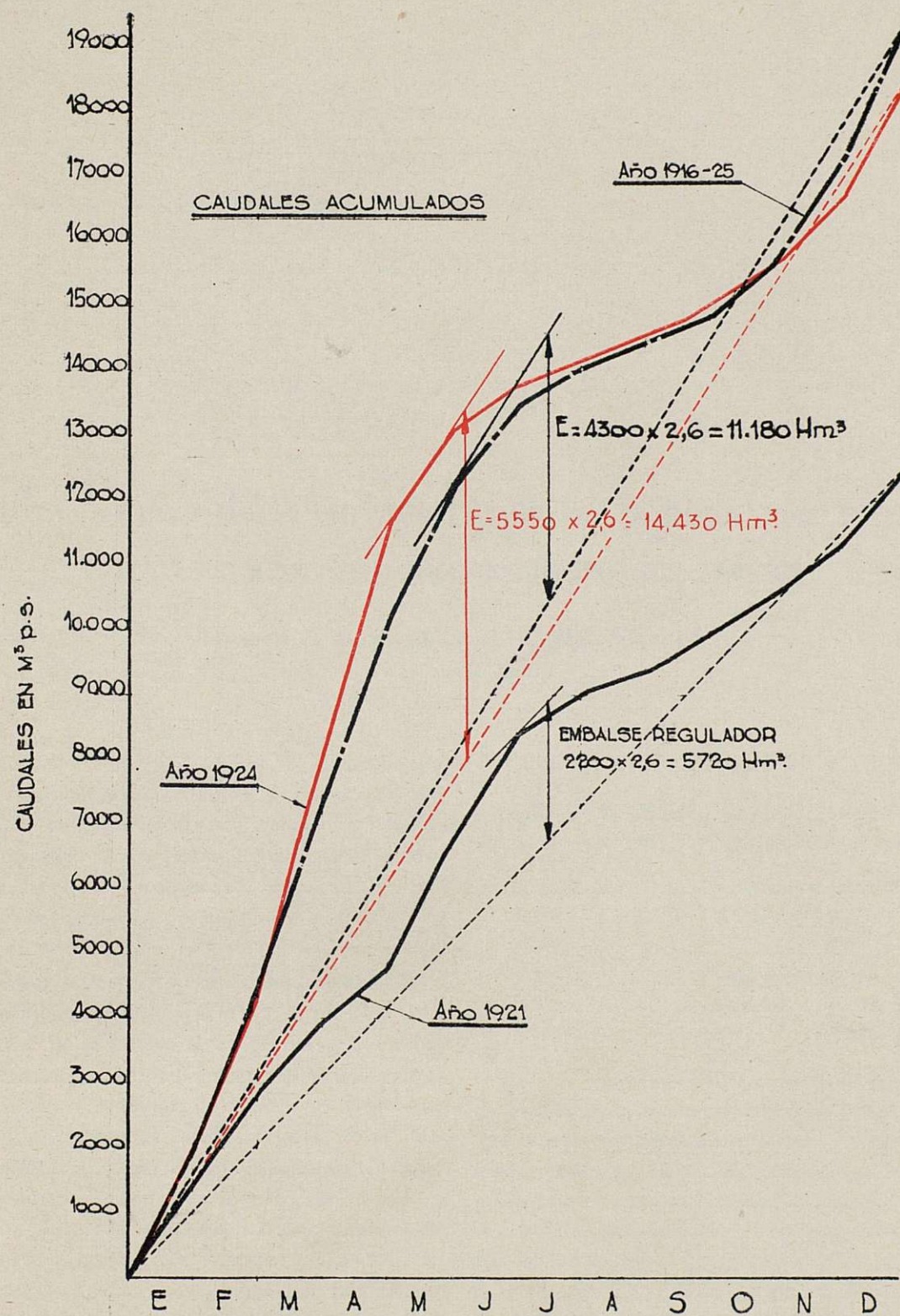
En definitiva, podemos retener como orden de magnitudes las siguientes cifras.

Año normal. Disponibilidades integrales	107.273,75 mill. kw.-h.		
» » » prácticas.	29.427,66 » »		
» seco » integrales			
» » » 68 % ...	72.946,— » »		
» » » prácticas.			
» » » 79 % ...	23.248,— » »		

*Al terminar la lectura de este trabajo, advierte el Sr. Presidente que sobre el mismo tema ha presentado el Sr. Redonet Maura otro, y que por ello sería de mayor rendimiento el que cualquier observación se hiciera al final de la lectura del mismo, a lo que se asiente.*

*Concedida la palabra al Sr. Redonet Maura, lee los siguientes estudios, números 18 y 19:*











## N.º 18. - Avance de un inventario de las posibilidades termoeléctricas nacionales con combustibles sólidos

Autor: D. JOSÉ LUIS REDONET MAURA

Ingeniero Industrial

En la Sección I del II Congreso Nacional de Ingeniería figura la energía térmica y, por ello, hemos creído de interés aportar en este trabajo los estudios que últimamente hemos realizado para tratar de determinar, de manera aproximada, cuáles son las posibilidades nacionales en producción termoeléctrica, si se parte de la utilización de los combustibles sólidos.

Con alguna frecuencia, al tratar del problema de la energía eléctrica, se ha afirmado que la solución para independizar de la influencia de sequías extraordinarias de nuestra producción industrial, debería consistir en invertir los términos de nuestra actual producción eléctrica, basándola, principalmente, en producciones térmicas en lugar de en producciones hidráulicas. A continuación estudiamos cuáles son, a nuestro juicio, las posibilidades termoeléctricas normales de nuestra nación, mucho más limitadas y con mayores dificultades para una rápida puesta en servicio, de lo que se ha afirmado en ocasiones.

### PRODUCCIÓN DE CARBÓN EN ESPAÑA

Según datos oficiales, la producción de carbón en los años 1946, 1947 y 1948, fué la siguiente:

CLASE	1946 Tm.	1947 Tm.	1948 Tm.
Antracita ... ..	1.500.229	1.426.780	1.459.176
Hulla ... ..	9.184.403	9.061.937	8.964.313
Lignito ... ..	1.335.868	1.275.294	1.398.402

Dada la gran importancia que tiene la producción de carbón en la economía nacional, se ha tratado de aumentarla sin resultados plenamente satisfactorios, según revelan las cifras anteriores. No es nuestro propósito entrar aquí a examinar las causas que se oponen a este aumento de producción, pero sí es hecho real que hemos de ajustar nuestra economía, en todo lo posible, al carbón nacional de que disponemos, tanto en calidad como en cantidad, ya que si te-



nemos que contar con el combustible de importación, ello supone, aparte de un gasto de divisas necesarias para otros fines, el hacer depender nuestras industrias básicas de los suministros que nos quieran conceder otros países.

Existe una serie de industrias y servicios, tales como ferrocarriles, fábricas de gas, industria siderúrgica, Marinas de Guerra y Mercante, pesqueros, azucareras, etcétera, que necesariamente han de disponer de carbón para su funcionamiento. Entre éstas, aparte de los ferrocarriles, preocupación primordial y constante del Gobierno, queremos destacar la industria siderúrgica que, como básica para la economía nacional, ha recibido en los últimos años especial trato para aumentar la producción nacional de hierro, para lo que son premisa indispensable suministros de carbón en las cantidades y calidades precisas, que han debido restarse de otras utilizaciones también de gran interés.

Todos cuantos han vivido un poco de cerca, en los últimos años, el problema del carbón para la producción eléctrica, conocen perfectamente las dificultades pasadas para obtener combustible en las cantidades y calidades precisas para un funcionamiento normal de las escasas centrales térmicas en actividad y, únicamente, en momentos de extrema penuria eléctrica se han restado a otros usos primordiales de la economía nacional los carbones precisos para la producción termoelectrica. Como dato interesante podemos citar que, de las principales centrales térmicas de cuyo suministro de carbón se ocupa UNESA, las cantidades pedidas y recibidas en los últimos cuatro años han sido las siguientes:

AÑO	Carbón pedido Tm.	Carbón recibido Tm.	%
1945 ... ..	1.091.685	748.750	68
1946 ... ..	844.100	582.428	68
1947 ... ..	714.500	518.313	73
1948 ... ..	829.450	639.882	76

En el año 1948 se advierte un porcentaje de carbón recibido superior por haberse comenzado en dicho año las importaciones de carbón inglés, del cual se han destinado 185.528 Tm. a las centrales térmicas. En el año 1949 se han realizado importaciones considerables de carbón inglés y francés, y, gracias a ello, han podido marchar las centrales térmicas con mayor normalidad.

Fácilmente se deduce que, si en los pasados años en que hubieron de aplicarse fuertes restricciones eléctricas en el mercado nacional, no fué posible atender íntegramente las demandas de combustible de las escasas centrales térmicas instaladas y únicamente a costa de importante dispendio de las divisas de que disponemos, pueden marchar estas centrales, no está en la construcción de muchas nuevas centrales térmicas la resolución del problema eléctrico nacional.

A nuestro juicio, la producción termoelectrica ha de limitarse en nuestro país, mientras no cambie fundamentalmente nuestra producción carbonera, a utilizar combustibles, pobres o inútiles para otros aprovechamientos, en centrales a bocamina y, por tanto, las posibilidades normales de producción termoelectrica han de quedar limitadas a las cantidades de estos carbones que, con explotación racional, puedan producirse normalmente. Ha de considerarse también que determinada industrias (azucareras, de cementos, cerámica, etcétera), utilizan ya, obligadas por las circunstancias, carbones pobres con gran cantidad de cenizas que así tienen, en la actualidad, colocación en el mercado.

#### FINALIDADES DE LA PRODUCCIÓN TERMO-ELÉCTRICA

La energía térmica en España, salvo muy contadas excepciones, ha de tener, a nuestro juicio, las siguientes finalidades:

- Servir de apoyo o regulador a la producción hidráulica fluyente, aunque esto ha de tratar de conseguirse, con preferencia, mediante embalses en la cabecera de los ríos.
- Servir para atender los aumentos de demanda del mercado, en tanto que se terminan las centrales hidráulicas en construcción, garantizando, de esta forma, mediante una producción térmica ocasional, la entrada en explotación, con un mercado propio, de los nuevos aprovechamientos hidráulicos.
- Servir como reserva o socorro para casos de extraordinaria sequía o averías.

En ningún caso debe substituirse por energía térmica una producción hidráulica posible, pues el agua que escapa por los aliviaderos de las centrales, representa una energía perdida para siempre, en tanto que el combustible que deja de quemarse en una central térmica puede siempre utilizarse con posterioridad, y, en todo



caso, representa una riqueza nacional imposible de reemplazar.

Indicadas ya cuáles son, a nuestro juicio, las finalidades que debe cumplir la energía térmica y cuáles deben ser las fuentes de esta energía, vamos a considerar, con la aproximación posible, las posibilidades nacionales de nuestra producción termoeléctrica:

## AVANCE DE LAS POSIBILIDADES POTENCIALES DE LAS DISTINTAS CUENCAS MINERAS

Antes de examinar la potencia de las centrales térmicas que pueden instalarse en nuestras cuencas carboníferas, queremos hacer algunas consideraciones de tipo general sobre determinados aspectos que han de ser tenidos en cuenta y que, en cierto modo, limitan aquella potencia.

El emplazamiento elegido para las centrales de bocamina dentro de la cuenca carbonífera ha de disponer de excelentes y económicas comunicaciones para el normal abastecimiento de combustible, que alcanzará fácilmente muchos cientos y aun miles de toneladas diarias, así como para la fácil evacuación de la gran cantidad de cenizas que origina la combustión de estos carbones pobres. Al mismo tiempo, ha de disponerse de agua suficiente para la refrigeración de la central, incluso con los estiajes más duros, ya que, precisamente, cuando se produzcan estos estiajes, deberá, por regla general, funcionar más intensamente la central térmica. La cantidad de agua precisa es del orden de 0,6 m<sup>3</sup>/s., por cada 10.000 kw. de potencia, a menos que se acuda a torres de refrigeración, siempre costosas. En nuestras cuencas mineras no siempre se dispone del agua en la cantidad y calidad precisas, ni de los medios de transporte necesarios, y estos factores de solución antieconómica, por regla general, limitan la potencia que se puede instalar.

Un segundo aspecto que hay que tener en cuenta, consiste en que, por regla general, no es conveniente que las explotaciones mineras tengan como único cliente una central térmica, pues, como es lógico, ésta funcionará únicamente durante los períodos en que no se disponga de energía hidráulica o de la procedente de otra térmica más económica, y estas intermitencias, que, a veces, son prolongadas, se compaginan difícilmente con la marcha regular que exige una explota-

ción minera, a menos que esté muy mecanizada la extracción. El ir almacenando el combustible no siempre es posible técnicamente, pues pueden presentarse combustiones espontáneas y, además, exige un capital inmovilizado cuyas cargas financieras vienen a recargar el coste del carbón.

A nuestro juicio, las centrales térmicas situadas en las cuencas carboníferas, han de quemar los mixtos, «schlams» y carbones pobres que, normalmente, se produzcan al extraer el carbón para otros usos industriales y, por tanto, salvo excepciones, la producción de estos carbones pobres debe determinar la potencia más conveniente de la central que se ha de instalar. En algunos casos, las centrales térmicas se utilizan para aprovechar producciones de vapor necesarias en industrias químicas, azucareras, papeleras, etcétera, o para quemar residuos (generalmente, semi-coques) de industrias destiladoras. En estos casos, como es lógico, son las necesidades de la industria principal las que determinan la potencia que se ha de instalar.

Las principales cuencas carboníferas españolas y las centrales que en ellas hay instaladas o que, a nuestro juicio, contrastado con el de otros técnicos especialistas, pudieran instalarse, como un avance aproximado, son las siguientes:

### ANTRACITA

1.º *Zona de Ponferrada*, que, a su vez, comprende las dos cuencas de Villablino y de Fabero.

Ambas cuencas están unidas por el ferrocarril de la Minero-Siderúrgica de Ponferrada, que termina en esta última población, y la segunda servida, además, por el ferrocarril de la RENFE. Las posibilidades de carbones pobres y menudos de esta cuenca quedan, a nuestro entender, absorbidas totalmente por la central térmica que en Ponferrada ha instalado la Empresa Nacional de Electricidad, con potencia inicial de 50.000 kw. y posible ampliación hasta los 100.000 kilovatios. Esta central ha buscado las proximidades del río Sil para disponer del agua necesaria para la refrigeración sin necesidad de torres. La Minero-Siderúrgica de Ponferrada tiene en funcionamiento una central de 13.000 kw., con la que aprovecha el relavado de una antigua escombrera de sus propios carbones.



2.º *Cuenca de Asturias* (Lena, Aller, Tineo, etc.).—Está intercalada geográficamente en la cuenca de hulla y, por tanto, los residuos de estos carbones podrán quemarse en las centrales térmicas de que tratamos, al considerar la cuenca de hulla en Asturias.

3.º *Cuenca de Palencia, Guardo, etc.*, que dispone en la actualidad de algunas pequeñas centrales térmicas, propiedad de las mismas sociedades mineras. Dentro de las posibilidades de agua de refrigeración, es posible instalar en el futuro alguna nueva central térmica que absorba los residuos de carbón y los carbones pobres de esta cuenca. No creemos que su potencia pueda exceder del orden de los 20.000 kw.

4.º *Cuenca de Peñarroya*, en la provincia de Córdoba, que tiene mucha menos importancia, y que, además, está próxima a su agotamiento, no creemos que presente posibilidades interesantes de producción térmica.

## HULLA

1.º *Cuenca de Asturias*.—La principal riqueza hullera española está en Asturias, en más del 70 %, y es allí donde han de instalarse y se están instalando las centrales térmicas que absorben los «schlams» y mixtos procedentes de la producción carbonera.

En la cuenca de Langreo, la central térmica de Lada, con su potencia prevista de 75.000 kw. y las actuales centrales de La Felguera y Sotón, que permanecerán en servicio mientras que ello sea necesario, quemando todos los residuos de la cuenca carbonífera, han de ser la base, por el momento, de la utilización lógica, en cuanto a producción termoelectrica, de esta cuenca.

En la cuenca del Aller, la central de Ujo, de la «Electra de Viesgo», que quema carbones ricos, complementa, en unión de la central de Gijón, de la «Hidroeléctrica del Cantábrico», la producción térmica de esta zona, pero prácticamente hoy no se utiliza el llamado «carbón de río», de la cuenca del Aller, especialmente indicado para la producción eléctrica, no obstante representar una cantidad anual del orden de 140.000 Tm. por las instalaciones defectuosas de los lavaderos actualmente en servicio. Aun cuando una mejora en los sistemas de lavado disminuirá el «carbón de río», se aumentará la producción de mixtos de segunda clase y, por eso, estimamos que podrá instalarse una térmica

en lugar de buenas comunicaciones; por ejemplo, en Avilés, con una potencia del orden de 40.000 kw. para utilizar estos carbones pobres de la cuenca del Aller, de idéntica manera que la central de Lada utiliza los de la cuenca de Langreo.

Cuando esté en plena producción el sistema de «La Camocha», en Gijón, acaso sea posible instalar una nueva central en aquella población que aproveche los residuos del lavado de este coto minero, pero la potencia no podrá ser mayor de unos 10.000 kw., por las perfectas condiciones de lavado del carbón de esta cuenca, que no produce apenas mixtos ni «schlams».

2.º *Cuenca de León* (Villablino, Sabero, Matallana, Carrocera, Boñar, etc.).—En esta cuenca se aprovechan los carbones de Villablino en la central de la Minero-Siderúrgica de Ponferrada y, además, existen actualmente otras centrales térmicas de poca potencia y mal rendimiento, propiedad de empresas mineras. Será posible, en el futuro, dentro de las posibilidades del agua de refrigeración, instalar alguna nueva central con mejor rendimiento que las existentes, especialmente en el coto de Santa Lucía, que permita absorber carbones inferiores y residuos de lavado de esta cuenca. Su potencia podría ser del orden de unos 12.000 kw.

3.º *Cuenca de Puertollano (Ciudad Real)*.—En esta cuenca, la Empresa Nacional «Calvo Sotelo», dentro de los planes de sus fabricaciones de carburantes y abonos nitrogenados por la destilación de pizarras bituminosas, construye una central térmica con potencia inicial de 30.000 kw., que llegará a 50.000 kilovatios, y que permitirá absorber prácticamente todos los menudos y carbones pobres de esta zona. Las dificultades de agua de refrigeración han sido especialmente importantes, por lo que ha sido necesario hacer una traída desde el río Montoro, con más de 20 Km. de longitud y, en todo caso, han de utilizarse torres de refrigeración. La Sociedad Minera y Metalúrgica de Peñarroya tiene también en Puertollano una central térmica en la que utilizan los carbones pobres de su propia producción minera.

4.º *Cuenca de Barruelo (Palencia)*.—En esta cuenca la producción de carbones pobres es muy escasa y se incorporan perfectamente a la fabricación de briquetas con destino a ferrocarriles, por lo cual no creemos existan posibilidades importantes para pensar en la instalación de alguna nueva central térmica.



5.º *Cuenca de Belmez y de Peñarroya (Córdoba).*—En esta cuenca, próxima a agotarse, no estimamos interesante establecer nuevas centrales térmicas, aparte de la que tiene en explotación la Minera Metalúrgica de Peñarroya.

6.º *Cuenca de Sevilla (Villanueva del Río y de Las Minas).*—En esta cuenca hay instalada una pequeña central térmica de poca capacidad y mal rendimiento, pero las dificultades de agotamiento de agua de estas minas no aconsejan explotación más intensa para alimentar una nueva central térmica.

7.º *Cuenca de Burgos (Villasur de los Herreros).*—Existió el proyecto, por ahora diferido, de instalar una central térmica de 20.000 kw. en esta cuenca minera, no muy conocida todavía. Desconocidas sus posibilidades reales de producción y la cantidad de agua de refrigeración de que podrá disponerse en el verano, estimamos preferible no incluir esta central en nuestro estudio, por compensarse, en todo caso, su posible instalación con la retirada del servicio activo a lo largo de los próximos años de otras centrales antiguas que computamos en este trabajo.

## LIGNITO

1.º *Zonas de Teruel y de Zaragoza.*—La zona lignífera más rica de España, todavía en su mayor parte sin explotar, se encuentra en las provincias de Teruel y de Zaragoza (Aliaga, Castellote, Alloza, Palomar, Escucha, Utrillas, Ariño, Rillo, Mequinenza y Fayón). Para el aprovechamiento eléctrico de las posibilidades de producción de estas cuencas, que estimamos muy considerables, se han proyectado las centrales térmicas de Aliaga y de Escatrón; la primera, por «Eléctricas Reunidas de Zaragoza», en el pueblo de aquel nombre, con una potencia inicial de 20.000 kw., que llegará a 40.000 kw. en la etapa definitiva, refrigerada por el río Guadalope. La gran central térmica de Escatrón, la está construyendo la Empresa Nacional «Calvo Sotelo», con grandes posibilidades de refrigeración, por encontrarse situada en la orilla del río Ebro. Mediante un ramal ferroviario que enlaza con la RENFE, podrá utilizar el carbón de la mayor parte de las minas de la cuenca. Esta central de Escatrón, tendrá una potencia inicial de 50.000 kw. y está prevista su ampliación hasta 210.000 kw., formando parte del con-

junto industrial de ENCASO, con las fabricaciones de carburantes y abonos amoniacales que, mediante la destilación de lignitos, instala la Empresa Nacional «Calvo Sotelo». La gran riqueza de estos yacimientos, que permite una explotación muy mecanizada de las minas y la lógica aplicación de estos carbones a la producción eléctrica, nos autoriza a prever una posible instalación suplementaria de 100.000 kw. más en esta cuenca.

2.º *Cuenca de Figols y de Berga (provincia de Barcelona).*—En esta cuenca funciona la central de Figols, que utiliza los lignitos a bocamina con una potencia instalada de 14.400 kw., que será difícil ampliar por dificultades de agua de refrigeración y de abastecimiento de combustible.

3.º *Cuenca de Las Puentes de García Rodríguez (La Coruña).*—Esta cuenca tiene considerable riqueza de lignitos pobres que pueden explotarse a cielo abierto. La ENCASO ha instalado una central térmica que funciona hace pocos meses, con potencia inicial de 32.000 kw., que se ampliará hasta un total de 48.000 kw., con la que se podrán utilizar las posibilidades de esta cuenca.

4.º Las restantes cuencas de lignito conocidas en España tienen poca importancia por el momento, aun cuando se ha apuntado la posibilidad de aprovechar para producción termoelectrica un yacimiento en la provincia de Granada, aparte de los de las Islas Baleares.

Además de las posibilidades térmicas señaladas para las diferentes cuencas carboníferas, existen en la actualidad instaladas una serie de centrales en las principales poblaciones (Madrid, Barcelona, Bilbao, Valencia, Sevilla, Coruña, etc.), la mayor parte de hace bastantes años, aun cuando algunas se han modernizado recientemente y otras acaban de inaugurarse, y que será interesante conservar no obstante su mal emplazamiento para nuestra producción carbonera, por tratarse de reserva interesante, en tanto que no se resuelva total y permanentemente la actual escasez de energía. En Barcelona hay el propósito de instalar una nueva térmica de 47.000 kw., y en Valencia de aumentar en 15.000 kw. la existente. Funcionan, además, en distintos puntos de España 10 centrales móviles importadas por el INI



CUENCA O POBLACIÓN	CENTRAL	Potencia real en explotación o en construc- ción Kw.	POTENCIA TOTAL POSIBLE Kw.	PRESIÓN DEL VAPOR kg./cm <sup>2</sup>	COMBUSTIBLE	GRUPO CLASIFICA- CIÓN	Observaciones
Ponferrada	ENESA	50.000	100.000	45	Menudos de antra- cita	I	
	M. S. Ponferrada	13.000	13.000	15	Relavado escombrera	I	
Palencia (Guardo)	—	—	20.000	—	Mixtos	I	
Asturias	Nada	50.000	75.000	36	Mixtos	I	
	Felguera	10.750	—	12	Mixtos	I	
	Sotón	8.800	8.800	12	Mixtos	I	
	Ujo	25.000	25.000	16	Granza y menudo	II	
	—	—	40.000	—	Mixtos	I	Cuenca Aller.
	—	—	10.000	—	Mixtos	I	Cuenca Camocha.
León	—	—	12.000	—	Mixtos	I	Cuenca Santa Lu- cía.
Puertollano	ENCASO	30.000	50.000	42	Hulla pulverizada	II	Destilación y abo- nos.
	M. M. Peñarroya	11.400	7.500	18	Hulla pulverizada	II	
Peñarroya	M. M. Peñarroya	5.000	5.000	15	Menudos hulla	II	
Teruel y Zaragoza	Escatrón	50.000	210.000	80	Lignito pulverizado	I	Destilación y abo- nos.
	Aliaga	20.000	40.000	27	Lignito pulverizado	I	
	—	—	100.000	—	Lignito pulverizado	I	
Figols	Figols	14.400	14.000	26	Menudo lignito	I	
Puentes de García Rodríguez	ENCASO	32.000	48.000	40	Lignito pulverizado	I	Destilación y abo- nos.
Barcelona	S. Adrián (C. F. E.)	20.000	20.000	28 y 16	Hulla pulverizada	III	Dificultad refri- geración.
	Mata	27.000	27.000	13	Granza hulla	III	
	S. Adrián (R. F. E.)	7.500	—	12	Granza hulla	III	
	S. Adrián (R. F. E.)	—	47.000	—	Menudo hulla	III	
Valencia	Grao	15.000	30.000	20	Granza hulla	III	
Bilbao	Burceña	24.000	24.000	26	Granza y menudo hulla	III	
Madrid	Melancólicos	12.400	12.400	12	Granza hulla	III	Limitada potencia en verano por refri- geración.
	Mazarredo	11.680	11.680	16	Granza hulla	III	
Alicante	Crevillente	3.640	3.640		«Fuel-oil»	III	
Sevilla	Guadaira	20.000	20.000	36	Menudo hulla	III	
	Prado	12.500	12.500	13	Menudo hulla	III	
Gijón	El Llano	2.000	2.000	14	Granza y menudo hulla	III	
La Coruña	G. G. de E.	1.360	1.360	12	Granza hulla	III	
Centrales móviles del INI.	Total, 10 centrales	31.000	31.000	27	3 de «fuel-oil», 7 de carbón menudo	IV	



## CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE LAS CENTRALES TÉRMICAS Y POSIBILIDADES DE LAS CUENCAS CARBONÍFERAS

Las centrales actualmente en explotación, construcción o proyecto, y las que hemos señalado como posibles en el futuro y todavía no proyectadas, van reseñadas en el cuadro que figura en la página anterior, clasificándolas en los cuatro grupos siguientes:

1.º Centrales en bocamina, que quemen, normalmente, residuos o carbones inferiores, o que produzcan electricidad como subproducto de otras industrias.

2.º Centrales en bocamina, que quemen carbones ricos.

3.º Centrales en centros de consumo, que quemen carbones ricos.

4.º Centrales móviles de «fuel-oil» y de carbón.

No incluimos en el cuadro anterior las pequeñas térmicas y las de propiedad particular, porque, lógicamente, irán desapareciendo cuando estén en explotación las grandes centrales en construcción y proyecto.

En el cuadro anterior se aprecia, en general, el escaso valor de las presiones de trabajo que, en cierto modo, vienen a medir el rendimiento de las centrales. En la actualidad, en el extranjero se llega ya, normalmente, a presiones superiores a los 100 kilogramos.

En España, dada la dificultad de disponer de recambios de construcción nacional para presiones superiores a los 30 ó 40 Kgs., estimamos que no es conveniente ni práctico ir, por ahora, a presiones exageradas, aun cuando admitamos que resultan hoy excesivamente bajas las de 12 Kgs. que tienen algunas de nuestras centrales. Además, dada la producción eminentemente hidráulica de nuestra economía eléctrica, la producción térmica ha de tener la suficiente elasticidad para acoplarse a las curvas de consumo, y complementar nuestra producción hidroeléctrica, y ello se consigue mejor con presiones más bajas y hogares de gran volumen, y quemando combustible pulverizado.

Algunas de las presiones de las nuevas centrales térmicas nacionales, principalmente las de la Empresa Nacional «Calvo Sotelo», vienen impuestas por la necesidad de disponer de vapor para otras fabricaciones, y, para ello, han de hacerse tomas intermedias a distintas presiones. Estas tomas determinan los escalones de presión más convenientes para cada una.

## AVANCE DE LAS POSIBILIDADES NACIONALES DE PRODUCCIÓN TERMOELÉCTRICA

Si se resumen los datos señalados en el cuadro anterior, llegamos a unas potencias posibles en el futuro, de los siguientes órdenes:

— Centrales en bocamina, que quemen combustibles pobres (grupo I) ... ..	690.800 kw.
— Centrales en bocamina, que quemen combustibles ricos (grupo II) ... ..	87.500 »
— Centrales en bocamina, que quemen combustibles ricos (grupo III) ... ..	211.580 »
— Centrales móviles (grupo IV) ... ..	31.000 »

TOTAL ... .. 1.020.880 kw.

Si admitimos como utilización máxima de la potencia térmica que, naturalmente, sólo se alcanzará en los años en que las condiciones excepcionales lo exijan:

para el grupo de centrales núm. 1 ... ..	4.000 horas anuales,
para el grupo de centrales núm. 2 ... ..	1.000 horas anuales,
para los grupos de centrales núms. 3 y 4. ... ..	500 horas anuales,

tendremos como posibilidades máximas normales de producción termoeléctrica en España, las siguientes:

$$690.800 \times 4.000 = 2.763.200.000 \text{ kw.-h.}$$

$$87.500 \times 1.000 = 87.500.000 \text{ »}$$

$$242.580 \times 500 = 121.290.000 \text{ »}$$

$$2.971.990.000 \text{ kw.-h.}$$

cifra que casi llega a triplicar la producción térmica alcanzada últimamente. Podría argumentarse que, cuando el plan total de centrales térmicas esté terminado, estarán fuera de servicio gran parte de las que ahora figuran en los grupos III y IV, pero creemos que, no obstante, deben considerarse estas potencias para compensar otras nuevas centrales que puedan instalarse sin estar en la actualidad previstas. Llegamos, por tanto, a la conclusión de que nuestras posibilidades térmicas son del orden de

3.000 MILLONES DE KW.-H.

Esta cifra ha sido aceptada últimamente por algunos técnicos ilustres en cuestiones eléctricas, quienes conocen nuestro trabajo y han estado conformes con él.

En este mismo II Congreso Nacional de Ingeniería, en su Sección II, hemos presentado un trabajo con el



título de *Avance de un inventario de las posibilidades hidroeléctricas nacionales*, en el que llegamos a la conclusión de que aquellas posibilidades, en año hidráulico normal, del orden de:

32.000 MILLONES DE KW.-H.

Esto representa, por tanto, cuando estén aprovechadas todas las disponibilidades del país, una producción anual de

35.000 MILLONES DE KW.-H.,

es decir, unas cinco veces la actual producción, y cuan-

do esto suceda, la relación entre potencias y producciones será la siguiente:

— Potencia de las centrales térmicas ...	10	% de la total.
— Potencia de las centrales hidráulicas ..	90	% de la total.
— Producción de las centrales térmicas ...	8,3	% de la total.
— Producción de las centrales hidráulicas.	91,7	% de la total.

cifras que demuestran que nuestra economía eléctrica ha de seguir apoyándose, fundamentalmente, en la producción hidroeléctrica y, que, a la construcción de estas centrales, hemos de dedicar con preferencia nuestros esfuerzos.

Madrid, diciembre de 1949.



## N.º 19. - Avance de un inventario de las posibilidades hidroeléctricas nacionales

Autor: D. JOSÉ LUIS REDONET MAURA

Ingeniero Industrial

Para cualquier estudio sobre la energía eléctrica en España, entendemos necesario conocer previamente con la aproximación posible, cuáles son las posibilidades de producción eléctrica en nuestro país y, muy especialmente, de nuestros medios hidráulicos.

Por esto, en el trabajo que con el título *La industria eléctrica en la industrialización de España* presentamos en las II Jornadas de Ingeniería Industrial, que tuvieron lugar en junio de 1949 en Bilbao y San Sebastián, dimos cuenta, entre otros temas, del resultado de nuestros estudios sobre esta materia, que, asimismo, fueron recogidos en artículo publicado en la *Revista de Ciencia Aplicada*, del Patronato «Juan de la Cierva».

Al incluirse entre los temas del II Congreso Nacional de Ingeniería, en su Sección II, «La energía hidroeléctrica», hemos creído interesante presentar este estudio, aportando con él nuestra colaboración a las conclusiones que se deduzcan de los interesantes trabajos que posiblemente presentarán sobre este tema otros especialistas.

### POSIBILIDADES DE PRODUCCIÓN HIDROELÉCTRICA EN ESPAÑA

La superficie total de la Península Ibérica es de 583.500 km<sup>2</sup>, de los cuales corresponden a España 492.247 km<sup>2</sup>. La masa central la constituye, esencialmente, la gran meseta ibérica, de unos 660 metros de altitud media. La precipitación pluviométrica es del orden de 500 a 600 mm. de promedio. Teniendo en cuenta estos antecedentes y al considerar que discurren íntegramente por territorio nacional todos los ríos de la vertiente mediterránea y de la cantábrica, así como, parcialmente, los de vertiente atlántica hasta su entrada en Portugal, fácilmente se deduce que ha de existir en España potencial hidráulico muy considerable.

### ESTUDIOS SOBRE EL POTENCIAL HIDROELÉCTRICO

La determinación de este potencial ha sido objeto de estudio por muchos técnicos que trataban de fijar-



lo, si no de manera exacta, por lo menos, aproximada. A continuación damos, por orden cronológico, los resultados de algunos de estos estudios, así como la fecha en que se hicieron, indicando el potencial en HP. y kw., ya que la primera unidad es la adoptada exclusivamente en estas primitivas determinaciones:

	HP	Kw.
Señor Pereira Carballo (1908) ... ..	5.000.000	3.680.000
Señor Aguinaga (?) ... ..	5.000.000	3.680.000
Señor Gallego Ramos (1917) ... ..	5.000.000	3.680.000
Congreso de Riegos de Sevilla (1918)...	8.000.000	5.888.000
Señor González Quijano (1926) ... ..	6.500.000	4.784.000
Señor De Guillén García (?) ... ..	10.000.000	7.360.000
Señor Pereira Carballo (1932) ... ..	12.483.000	9.187.488

Las cifras anteriores se refieren a un potencial teórico, y se estima el prácticamente aprovechable en valores muy inferiores. Es de observar que va aumentando este potencial según resultan más completos los conocimientos de las distintas cuencas, y así, un mismo tratadista, como el señor Pereira Carballo, da valores muy dispares en 1908 y 1932.

En 1932, el Consejo de la Energía, dependiente del Ministerio de Obras Públicas, publicó, con el título de «Avance para una evaluación de la energía hidráulica de España», por el Ingeniero de Caminos don Pedro M. González Quijano, muy documentado trabajo sobre este tema, en el que se llega a la conclusión de que la potencia teórica en HP. es en nuestro país de

11.122.980 HP.,

equivalente, por tanto, a

8.186.513 kw.

En julio de 1946, la Dirección General de Industria, en su publicación «La industria de producción de energía eléctrica en España», señala para la energía potencial teórica y la energía potencial real de nuestros posibles aprovechamientos hidráulicos las siguientes cifras:

- Energía potencial teórica ... .. 8.510.000 kw.
- Energía potencial práctica ... .. 4.613.900 »

Todos los estudios citados para la determinación de nuestro potencial hidráulico se basan, fundamentalmente, en la determinación de las lluvias recogidas normalmente en las distintas cuencas, el coeficiente correspondiente de escorrentía y la parte importante de agua que se pierde por evaporación en las distintas épocas del año. En los casos en que es posible, se

parte de los datos suministrados por las estaciones oficiales de aforos que, desgraciadamente, hasta hace no muchos años, eran insuficientes y con pocas garantías de exactitud.

Debido a que los estudios pluviométricos en nuestro país revelan gran desigualdad en la distribución de lluvias en las distintas zonas, así como muy importante variación de un año a otro, es evidente que juega papel importantísimo en la determinación de nuestro potencial hidráulico la regulación de que pueda disponerse en nuestros ríos, principalmente mediante embalses de cabecera que mantengan las aportaciones, no solamente a lo largo de los distintos meses del año, sino también en ciclos hiperanuales, para compensar con las aguas abundantes de los años húmedos, las sequías que periódicamente se presentan.

En la obra antes citada del señor González Quijano, se llegaba a la conclusión de que la capacidad de embalse para conseguir una regulación anual en los principales ríos españoles debería elevarse a metros cúbicos 19.500.000.000 y que había de forzarse aún más esta capacidad si se quisiera conseguir la regulación hiperanual.

La construcción de estos grandes embalses reguladores es muy costosa y difícil, tanto por la dificultad de encontrar lugar adecuado para el vaso, como por el coste en sí de la obra y, sobre todo, de los terrenos y pueblos que han de expropiarse y que, por regla general, constituyen zonas de vegas ricas, así como porque en muchas ocasiones han de desviarse carreteras y ferrocarriles para permitir aprovechar la capacidad total del vaso. Estas costosas obras ponen muchas veces la construcción de estos embalses fuera de la capacidad económica de los usuarios industriales y agrícolas y, por ello, es el Estado, con una acertada política hidráulica, el que las acomete a través de las Confederaciones Hidrográficas, pensando no tan sólo en la producción de energía eléctrica, sino también, y principalmente, en la posibilidad de poner en riego extensas zonas de secano en beneficio de nuestra riqueza agrícola.

## NUEVA DETERMINACIÓN DE NUESTRO POTENCIAL HIDROELÉCTRICO

En la actualidad, tanto por estar ya perfectamente definido el plan de nuevos embalses, como por los de



tallados estudios que las principales sociedades eléctricas están haciendo de los ríos en que tienen sus aprovechamientos, se dispone de información mucho más completa que en épocas anteriores, que permite determinar nuestro potencial hidráulico con mucha mayor aproximación que por los procedimientos que hasta ahora se han seguido.

En tanto que las Confederaciones Hidrográficas, con su autoridad y su conocimiento exacto de cada cuenca, dan publicidad oficial de las posibilidades patrias en materia de energía hidráulica, hemos realizado nuestro estudio sin otra pretensión que la de que constituye un avance de aquellas posibilidades. Partimos para ello de las potencias actualmente instaladas en las

distintas cuencas. A estas potencias añadimos las de las obras que están en construcción y cuyas características están, por tanto, perfectamente fijadas. Igualmente, añadimos la energía aproximada que habrá de instalarse en las centrales de pie de presa de los embalses en construcción o en proyecto y, por último, la potencia de las concesiones cuya petición se ha hecho oficialmente en el *Boletín Oficial del Estado* y la correspondiente a los estudios de cada una de las principales sociedades en las cuencas en que actúan, en el caso en que se llegue a aprovechamientos integrales de los ríos.

A continuación, damos el cuadro resumen de nuestro trabajo:

Potencial hidroeléctrico real de España, con datos referidos al 31 de diciembre de 1948

CUENCA	Instalado Kw.	En construcción Kw.	Proyectos pie de presa de embalses del Estado Kw.	Proyectos en estudio y estimación del resto Kw.	TOTAL GENERAL Kw.
Norte de España .....	278.383	169.420	5.040	555.000	1.007.843
Miño .....	20.286	414.160	8.000	808.000	1.250.446
Duero .....	156.726	171.800	72.160	1.100.000	1.500.686
Tajo .....	127.715	163.260	11.296	1.020.000	1.322.211
Guadiana .....	7.175	0	31.776	75.000	113.951
Guadalquivir .....	112.333	82.992	48.648	96.000	339.973
Pirineo Septentrional .....	37.132	35.200	0	150.000	222.332
Pirineo Oriental .....	42.127	1.400	24.864	10.000	78.391
Ebro .....	614.515	209.920	44.736	1.355.500	2.224.671
Levante .....	43.081	15.856	21.472	85.000	165.409
Júcar .....	232.146	81.600	50.400	190.000	554.146
Segura .....	18.460	5.609	22.104	20.000	66.164
Sur de España .....	63.271	8.000	1.500	72.000	144.771
TOTALES .....	1.753.350	1.359.148	341.996	5.536.500	8.990.994

La cifra aproximada de:

9 millones de kw.,

a que llegamos en nuestro avance para el potencial hidroeléctrico *práctico* de España, es muy superior a las que, hasta ahora, se han fijado, e incluso mayor que la correspondiente al potencial *teórico* que señalan en sus trabajos la Dirección General de Industria y D. Pedro M. González Quijano.

#### POSIBILIDADES DE PRODUCCIÓN HIDRO-ELÉCTRICA

Una vez determinada nuestra potencia hidráulica práctica, es decir, aquella cuya instalación es posible,

para calcular la producción correspondiente, hemos de fijar la utilización que esperamos obtener de aquella potencia.

Esta utilización viene determinada, tanto por la forma de la curva, según la cual el mercado toma la energía, como por las disponibilidades de agua en las turbinas, durante las distintas épocas del año. Como los datos de nuestro estudio proceden, en su casi totalidad, de los trabajos y proyectos de las empresas, ha de suponerse que las potencias señaladas son las más convenientes para una explotación racional de nuestros ríos para atender el consumo de los mercados y que, por tanto, si alguna central de pie de presa está superequipada para dar las «puntas» y tiene,



por tanto, una baja utilización, se conjugará con otras centrales cuya potencia tendrá utilización más elevada por funcionar como base en el sistema correspondiente.

En las actuales condiciones de demanda del mercado y regulación de los ríos, por los estudios que hemos realizado, hemos llegado a la conclusión de que 3.100 horas anuales constituye un máximo de utilización de nuestra potencia hidroeléctrica, para garantizar un servicio normal al mercado. Cuando el plan de embalses en construcción sea realidad y simultáneamente se consiga modificar la curva actual de la demanda del mercado mediante adecuada política de tarifas y la implantación de la gran industria electroquímica, creemos que se podrá llegar a una utilización normal en España del orden de las 4.000 horas para las centrales hidráulicas, pero esto no podrá suceder antes de bastantes años. Si se aplican ambos límites a la potencia antes deducida, llegamos a las siguientes cifras como posibilidades máximas de producción hidroeléctrica en España:

$$3.100 \times 9.000.000 = 27.900.000.000 \text{ kw.-h}$$

$$4.000 \times 9.000.000 = 36.000.000.000 \text{ »}$$

Podemos, pues, admitir como cifra prudente de producción anual posible, incluso en año seco, cuando el plan de construcciones hidráulicas esté agotado, la de:

$$32.000.000.000 \text{ kw.-h.}$$

lo que representa, aproximadamente, seis veces la actual producción hidroeléctrica.

En este mismo Congreso Nacional de Ingeniería hemos presentado en su Sección I un trabajo con el título *Avance de un inventario de las posibilidades termoeléctricas nacionales con combustibles sólidos*, en el cual llegamos a la conclusión de que aquellas posibilidades pueden cifrarse en el orden de

### 3.000 MILLONES DE KW.-H. ANUALES

Esto representa, por tanto, cuando estén aprovechadas todas las disponibilidades del país, una producción anual de

### 35.000 MILLONES DE KW.-H.,

es decir, unas cinco veces la actual producción, y, cuando esto suceda, la relación entre potencias y producciones será la siguiente:

— Potencia de las centrales térmicas ...	10	% de la total.
— Potencia de las centrales hidráulicas...	90	% de la total.
— Producción de las centrales térmicas ...	8,3	% de la total.
— Producción de las centrales hidráulicas.	91,7	% de la total.

cifras que demuestran que nuestra economía eléctrica ha de seguir apoyándose, fundamentalmente, en la producción hidráulica y que a la construcción de estas centrales hemos de dedicar con preferencia nuestros esfuerzos.

Madrid, diciembre 1949.

---

*Por no presentarse observaciones a los dos anteriores trabajos, el Presidente concede la palabra a D. Pedro Martínez Artola, quien procedió a la lectura, en nombre de su autor, D. David Soler Carreras, que se encuentra ausente, del siguiente trabajo:*



## N.º 106. - Los supuestos económicos de una política eléctrica

Autor: D. DAVID SOLER CARRERAS

Ingeniero Industrial

### 0. OBJETO DEL ESTUDIO.

Hemos atravesado últimamente un período de tiempo, que desearía creer se halla tocando a su fin, caracterizado por la preponderante importancia que se ha dado a la acción ante el pensamiento, posiblemente como un aspecto más de la eterna lucha entre los hechos y el derecho, entre el ser y el deber ser. No cabe dudar de que tal norma de conducta presenta especiales atractivos, sobre todo, para las juventudes que no han sufrido aún la dura prueba del fuego que significa la experiencia, pero creo estaremos todos de acuerdo en que los resultados obtenidos no han sido los que se esperaban, y que los desengaños han sido suficientes, si no para justificar un cambio total de frente, sí, por lo menos, para hacer deseable una nueva consideración de los problemas cuya solución se abordó de acuerdo con aquella norma. Sin embargo, puede darse aún algo peor; resulta quizás más perjudicial para el buen éxito de nuestros propósitos admitir como base de actuación pensamientos insuficientemente considerados y ponernos alegremente a trabajar de acuerdo con ellos, intentando acallar, en todo caso, con nuestro ardor en el trabajo, el gusanillo de

la conciencia que insiste en llamar nuestra atención sobre la insuficiente sustentación de las bases sobre las que aseguramos apoyarnos.

Hago estas consideraciones, que podrán parecer fuera de cuento, a la vista del título de la cuarta ponencia de ese Congreso, que trata de una materia a la cual, supongo, nadie osará negar un indudable interés: «Solución para la mejora de la producción eléctrica». A primera vista no parecen existir posibilidades de duda sobre la conveniencia de incrementar la producción nacional de energía para aumentar el bajo nivel de vida de nuestro país; finalidad a la cual, a pesar de las dificultades que la precisa definición del concepto suscita, se halla indudablemente dirigida toda la actividad de este Congreso; sobre todo, después del estudio hecho por nuestro compañero Antonio Robert, en su obra *El mañana económico de España*, de la relación existente entre las rentas nacionales y los consumos de energía, y que él expresa en forma de una ecuación lineal. Sin embargo, y por más agobiante que deba resultar tan extraordinaria unanimidad de pareceres, existe cierto hecho que desde hace algún tiempo ha determinado un paulatino enfriamiento de mi entusiasmo por aquella afirmación —y su conse-



cuencia práctica, la construcción a ultranza de grandes centrales eléctricas— hasta el punto de que hoy en día me siento inclinado, si no a negar en absoluto su validez, sí, por lo menos, a desear verla sometida a una serie de condicionantes que, o mucho me equivoco, o habrán de reducir en grado notable la importancia que se le atribuye.

Y es que el inocente hecho a que acabo de referirme tiene un origen especial que le da fuerzas para sostenerlo firme en su posición, independientemente del mayor o menor caso que quiera hacerse de su muda elocuencia, como si conociera no ser nuevo en la historia la existencia de quien tiene oídos y no quiere oír, y se hallara convencido de que, tarde o temprano, los mismos que ahora parecen ignorarlo habrán de volver a él sus ojos como ha ocurrido siempre con los de su misma procedencia. Supongo se habrá adivinado que el origen a que me refiero es el experimental, y que el hecho es un dato estadístico tomado de la observación de la realidad. Ésta nos dice:

	1929	1948
Producción de energía eléctrica (en millones de kw.-h.).....	2.658	6.574
Renta nacional real (en millones de pesetas de 1929).....	24.759	24.154

Es decir, que, no obstante ser la producción de energía eléctrica en 1948 más de un 150 % superior a la de 1929, la renta nacional real, medida en la misma unidad monetaria, no ha alcanzado siquiera el nivel de aquella fecha. Y, a pesar de ello, en 1948 hubo que aplicar restricciones en los suministros de electricidad, por falta de energía.

Existen razones que permiten defender la hipótesis de que las anomalías producidas por nuestra guerra y la mundial que a continuación se desencadenó, impidieron dedicar al desarrollo en la producción de energía toda la influencia beneficiosa que corrientemente se le atribuye, aun admitiendo su certeza —a mi juicio, un poco capciosa, ya que las mismas causas que redujeron el nivel general de vida deberían haber disminuído el consumo de energía—, la magnitud de las discrepancias observadas es tal que, a mi juicio, difícilmente se conseguirá convencer a ningún observador imparcial de que haya bastado para producir resultados tan fuera de lo esperado. Parece, pues, conveniente aplicar nuestra atención a la búsqueda

de otras posibles causas de tal fenómeno, por ser indudable que su conocimiento nos pondrá en mejor situación para hallar fórmulas más adecuadas a fin de procurar el incremento del dividendo nacional, finalidad a la cual convergen los esfuerzos de los aquí reunidos.

Un análisis lógico, al que no nos queda más remedio que recurrir, nos ofrece como factores posibles de la divergencia, y que pueden obrar separada o conjuntamente, los tres siguientes:

- Errores en las estadísticas oficiales.
- Tendencia secular a un aumento de energía consumida a igualdad de renta nacional.
- Existencia de factores que contrarrestan el efecto beneficioso del aumento de producción de energía eléctrica.

No seré yo el que niegue la importancia de la primera causa, ya que precisamente en nuestro trabajo sobre «Los factores distributivos en la industrialización española», presentado con motivo de las II Jornadas de Ingeniería Industrial, tuve que dedicar bastantes páginas al intento de corregir los datos oficiales, evidentemente inadmisibles, en que se basaba mi estudio; ni quiero tampoco entrar en el análisis de los problemas que presenta la tendencia secular a que me refiero en la segunda y que, a mi juicio, no constituye más que uno de los muchos factores del proceso creciente de mecanización que tiene lugar desde hace dos siglos; pero creo no apartarme mucho de la realidad si estimo que, a menos de querer admitir que el aumento en la producción de energía debe considerarse causa directa del estancamiento de la renta nacional, el motivo fundamental de la anomalía que nos ocupa ha de buscarse precisamente en la tercera causa señalada; es decir, que a pesar del poderoso incremento de la producción de energía eléctrica —quizás la más notable contribución de los ingenieros de diversas especialidades al resurgir de la economía española—, sus esfuerzos se han visto malogrados por factores que, al escapar en gran parte a su competencia, no han podido ser contrarrestados por ellos en forma suficiente. Merece, pues, la pena intentar señalar tales obstáculos con objeto de que, si su eliminación resulta posible, se permita al aumento de energía desempeñar el papel beneficioso que unánimemente se le atribuye, y en el caso de oponerse a ello circunstancias insuperables por el momento, asegurar



nuestra confianza en el camino emprendido y darnos mayor ardor, si cabe, para su prosecución, en espera de que la desaparición de tales circunstancias haga factible lo que hoy día no lo es.

Por ello me ha parecido que quizás no estaría de más, como modesta contribución del autor a la magnitud de este Congreso, dedicar algunas páginas al estudio de los supuestos económicos de una política eléctrica, páginas en las cuales deseo quede bien claro, no deben buscarse teorías nuevas ni soluciones atrevidas que tanto daño pueden hacer al ser aplicadas irreflexivamente, sino el simple deseo de recordar conocimientos olvidados de puro sabidos con la esperanza de que quien disponga de más tiempo y más abundante material de estudio pueda desarrollarlos, en el grado necesario, para derivar de ellos consecuencias prácticas que permitan conseguir se haga realidad lo que todos anhelamos. Quizá tampoco no está de más indicar, desde el primer momento, que el propio objeto del ensayo implica una estricta limitación de su contenido a aquellas líneas de acción generales formuladas conforme a plan por el Estado en materia de electricidad, como bases, a modo de infraestructura, de las medidas concretas que hayan de adoptarse en cada caso particular, de acuerdo con sus circunstancias específicas, entre las que figurarán seguramente algunas o muchas de carácter extraeconómico.

## I. EL PUNTO DE VISTA DE LAS EMPRESAS

### 1. LA TEORÍA ECONÓMICA DE LAS INVERSIONES ELÉCTRICAS.

I. En un régimen económico basado en la propiedad privada, la libertad de iniciativa y la libre competencia, la regulación de la producción se realiza teóricamente por los propios consumidores a través del mercado mediante la actuación del mecanismo de los precios. Esta regulación no es nunca absoluta, ni siquiera a corto plazo —es decir, en un plazo en el que no sea posible poner en marcha nuevos medios de producción— por las fricciones debidas a la competencia imperfecta y a la falta de instantaneidad de la producción o, lo que es lo mismo, por la necesidad en que se hallan los empresarios de determinar lo que van a producir en el futuro tomando como base los

precios que esperan han de regir en el momento en que el producto podrá ponerse a la venta, más que en los que se hallan en vigor en el momento de iniciarse la producción. En las decisiones económicas a largo plazo, y en grado tanto mayor cuanto más largo el plazo es, el equilibrio se vuelve más problemático por causa del efecto desconocido del nuevo factor «innovaciones de la técnica», y las expectativas desempeñan papel decisivo.

Sean  $Q_1, Q_2 \dots Q_n$  los rendimientos probables de la inversión durante la serie de años  $n$  en que se calcula habrá de ser rentable, una vez multiplicados por coeficientes adecuados para tener en cuenta el riesgo de que no lleguen a obtenerse (1), y sean  $S_1, S_2 \dots S_n$  los gastos que la misma inversión se prevé habrá de originar durante el mismo período de tiempo; evidentemente algunos, pero no todos, de los rendimientos y los gastos podrán ser iguales a cero. La inversión se considerará rentable si el valor descontado de los primeros, o sea, la suma de los valores actuales equivalentes a los futuros, de acuerdo con las tasas de descuento que rigen para los sucesivos períodos en que se calcula tendrán lugar los ingresos, es igual o mayor que la suma del valor descontado de los gastos; es decir, si

$$\sum_{i=1}^n Q_i r_i \geq \sum_{i=1}^n S_i r_i$$

o, lo que es lo mismo,

$$\sum_{i=1}^n (Q_i - r_i) r_i \geq 0 \quad (a)$$

siendo  $r_i$  el valor descontado actual de una peseta en el año  $i$ .

En la práctica de las inversiones hidroeléctricas, la relación puede escribirse en forma algo distinta, ya que, si bien se mantiene la distinción entre rendimientos y gastos, sólo se consideran entre estos últimos los propios de nuevo establecimiento, mientras que todos los demás se contabilizan en las expectativas como simple disminución de los rendimientos. Si llamamos  $S'$  a los primeros y  $S''$  a los segundos, tenemos en cuenta que por lo común la inversión sólo

(1) Para el concepto de riesgo de un rendimiento, véase Hicks, *Valor y capital*, pág. 142. Ed. española, si bien el tratamiento no es idéntico.



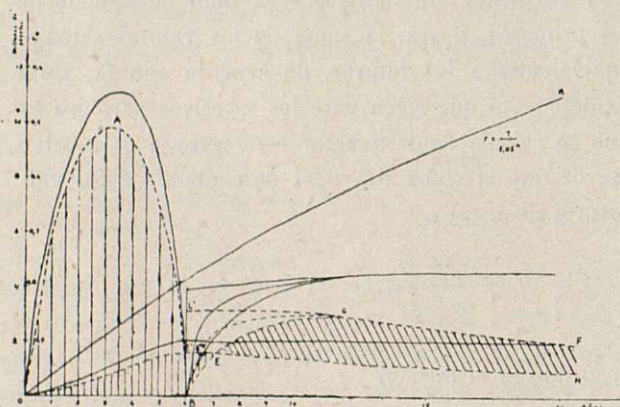
empezará a rendir una vez terminada su construcción, y suponemos que ésta se verifica en un tiempo  $t$ , la fórmula anterior se transforma en

$$\sum_{i=t}^{i=n} (Q_i - S_i') r_i \stackrel{i=t}{=} \sum_{i=1}^{i=t} (S_i' - S_i'') r_i \quad (b)$$

que nos dice que la inversión habrá dejado de rendir a partir de un tiempo  $p$ , a partir del cual se cumpla

$$\sum_{i=p}^{i=p+x} (Q_i - S_i') r_i \leq 0$$

para todos los valores positivos de  $x$ . En la figura 1 se ha representado gráficamente la exposición anterior. La línea OR es el valor descontado una peseta al cabo de  $n$  años (en la figura se ha supuesto la tasa de descuentos constante e igual al 5 %), las líneas con-



tinuas son las de cantidades reales; las de trazos, de cantidades descontadas. El coste descontado de la instalación es OAB, el de la explotación y organización OEH..., los ingresos descontados son BEGF..., para que la inversión sea rentable es preciso que

$$EGF \dots HE \stackrel{>}{=} OABO + OEBO$$

II. Las inversiones eléctricas presentan, además, un cierto número de características que les dan aspecto peculiar.

a) Son inversiones a muy largo plazo; por tanto, las perspectivas de rendimientos probables habrán de adolecer de alto grado de incertidumbre que sólo puede compensarse multiplicándolos por un coeficiente de riesgo, tanto menor que la unidad cuanto más

largo el plazo es. En general, puede decirse que el obstáculo principal que se opone a esta clase de inversiones es la falta de seguridad política: a igualdad de las demás condiciones, los países con más convulsiones políticas ofrecen menos volumen de inversiones capitalistas; inconveniente que sólo en parte está contrarrestado por el hecho de que esa misma limitación ofrece garantía de mayor rentabilidad. Esta afirmación tiene un valor absoluto para las inversiones de capital extranjero; en cuanto a los nacionales, una adecuada intervención de divisas disminuye mucho el volumen del obstáculo por la imposibilidad en que se hallan de buscar un refugio, más o menos seguro, en el extranjero.

Debe notarse, sin embargo, como nota favorable, que en las inversiones eléctricas la incertidumbre que de notablemente reducida por el criterio unánime de que el aumento de consumo de energía puede calcularse con facilidad mediante extrapolación de los datos de los años anteriores. Probablemente, tal criterio es certero, pero en último extremo su exactitud no se discute, hoy por hoy, en el cálculo de esperanzas, y con ello basta; en un tiempo más lejano quizá se tenga en cuenta la importancia relativa de los aprovechamientos de otras fuentes de energía y, en cuanto a las centrales hidráulicas, la posibilidad de cambios de clima que afecten a la magnitud de los coeficientes de riesgo de los rendimientos.

b) Significan un gran volumen de capital, tanto en valor absoluto como relativo, es decir, como factor determinante del coste de la energía producida; circunstancia que influye en dos sentidos:

En primer lugar, gran volumen relativo de capital significa gran dependencia de los rendimientos netos respecto a los tipos de interés a largo plazo del mercado, ya que, cuanto mayores sean éstos, tanto mayores serán las cantidades anuales que haya que pagar en concepto de intereses. Ciertamente cabría recurrir a una conversión en épocas de interés bajo, pero la generalización de tal práctica habría de repercutir en la aceptación de las emisiones, obligando a señalar para las mismas intereses más altos. Si la rebaja en el tipo de interés que se espera es substancial, puede convenir a la empresa un retraso en la iniciación de la puesta en práctica de sus proyectos, aun en el caso de existir una gran demanda de energía, y que, debido a la intervención oficial de las tarifas de



suministro, esta demanda no puede afectar a los precios.

Pero, además, en el caso de nuevas construcciones necesarias, si no quieren ver invadir su mercado, las empresas se verán obligadas a ampliar considerablemente su capital, lo que, si se verifica en forma de nuevas acciones, puede determinar la pérdida de la preponderancia en la empresa por el primitivo grupo director, dada la imposibilidad de atender por sí mismo a las nuevas necesidades financieras. También puede ocurrir que la necesidad de convencer a los futuros suscriptores de la rentabilidad de la inversión induzca a elevar los dividendos en detrimento de las amortizaciones, y como el fisco sólo señala para ellas tasas máximas, nada impide llegar a un acuerdo sobre la materia entre Estado y empresa, con los inconvenientes que, tarde o temprano, se derivan de todo falseamiento de la realidad. Y, si deciden endeudarse mediante la emisión de obligaciones, cuanto mayor sea la cantidad que la empresa decida tomar a préstamo, tanto mayor será el riesgo que correrán las ganancias de su propio capital y mayor el freno para incrementar los planes de inversión.

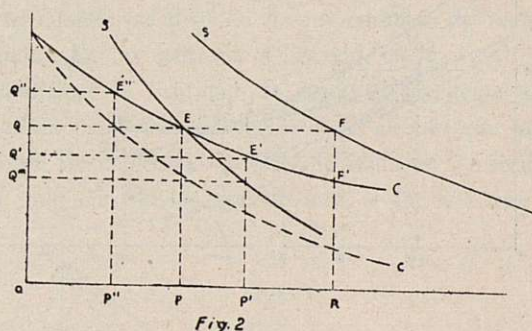
c) Por lo que se refiere a las centrales hidroeléctricas con presas de regulación, significan elevado volumen de primeras materias para cuya consecución pueden existir en ciertos casos dificultades especiales. En régimen de libre competencia ello se traduciría en una elevación de precios que aumentaría el coste total de la obra; con economía intervenida, los precios posiblemente serán menores, pero los cupos pueden resultar insuficientes para el ritmo previsto de construcción obligando a prolongar la duración de la obra, con el peligro de variaciones en los precios de los materiales, y la necesidad de admitir en la fórmula (b) un tiempo  $t$  superior al económicamente necesario, lo que, en definitiva, se traduce en una reducción del valor actual de los ingresos previstos.

## 2. TEORÍA ECONÓMICA DE LAS EXPLOTACIONES ELÉCTRICAS.

I. Desde que la técnica resolvió el problema del transporte de energía a grandes distancias, se hizo inevitable que las explotaciones eléctricas tendieran al régimen de monopolio, no sólo por las economías internas inherentes a toda concentración industrial, sino

por el mejor aprovechamiento de sus líneas de transporte y redes de distribución; tanto más cuanto que la mayor magnitud de las empresas les permitió disponer de más medios para conseguir un mejor asesoramiento en el aspecto económico de sus explotaciones. El hecho de que las centrales hidroeléctricas trabajen con costes decrecientes —por lo menos, hasta el límite de su óptimo aprovechamiento— y de que la mayoría de las empresas tengan como base de sus suministros energía de origen hidráulico, cooperó decisivamente en el mismo sentido.

En efecto, sean  $C$  y  $c$  los costes medio y marginal, ambos decrecientes, de dos empresas en competencia que, para mayor sencillez, supondremos absolutamente análogas (fig. 2), y sea  $S$  la curva de demanda, también igual, de cada una de las dos empresas. El equilibrio económico de cada empresa tendrá lugar en el punto  $E$ , en que el coste medio iguala el precio



de demanda, y cada una de las dos empresas producirá una cantidad  $OP$  que venderá al precio  $OQ$ . Pero, si alguna de ellas se halla en condiciones de aumentar su producción con costes decrecientes, tal equilibrio resultará inestable, ya que, al producir más, podrá vender más barato, y su punto de equilibrio se desplazará hasta  $E'$  si la reducción de precio alcanza hasta  $OQ'$ . Una parte del aumento de producción quizá sea debida a la aparición de nuevos consumidores, pero lo más probable es que substancialmente se consiga a expensas de la empresa competidora, cuya venta quedará reducida a  $OP''$  y determinándole un coste medio  $OQ''$ , que, al ser superior al de venta  $OQ$ , le pondrá en el trance de desaparecer; y si las dos producen la misma cantidad  $OP'$  perderán dinero ambas, ya que el precio  $OQ'$  a que podrán vender tal producción será inferior al de coste. A la larga, alguna de las empresas tendría que abandonar el ne-



gocio, y la que subsistiese disfrutaría de situación inmejorable, ya que si decidiera vender la misma cantidad que absorbía antes el mercado al precio OQ, es decir,  $OR = 20P$ , el coste de cada unidad sería ahora  $RF'$ , con una ganancia  $FF'$  por unidad producida. Se ve, pues, que la persistencia de los costes decrecientes es una fuerza que invita poderosamente a la unificación y como consecuencia al monopolio.

Estudiemos ahora la conveniencia de una intervención de los precios en el caso de un monopolio con costes decrecientes. Sean (fig. 3)  $I$  e  $i$  las curvas de ingreso medio y marginal de una explotación de esta clase, y  $C$  y  $c$  sus curvas de costes medio y marginal. En régimen de monopolio la producción vendrá determinada por la intersección de las curvas marginales

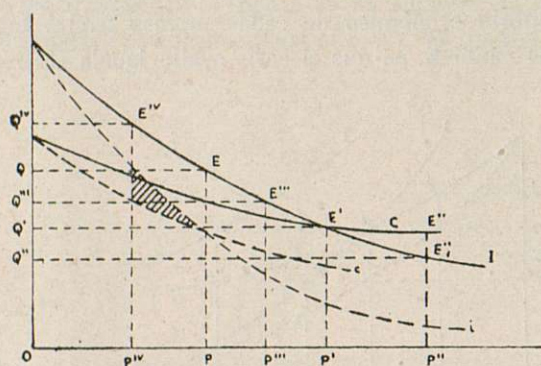


Fig. 3

$c$  e  $i$ , con una cantidad producida  $OP$  al precio  $OQ$ ; en régimen de competencia —en este caso diríamos mejor de beneficio nulo por ser la competencia inestable— por la de las curvas medias  $C$  e  $I$ , con una producción  $OP'$  al precio de  $OQ'$ ; y la fijación de un precio intervenido podrá determinar los siguientes casos:

a) Si el precio que se fija  $OQ''$  es inferior al de competencia, la explotación resultará antieconómica, ya que se venderá una cantidad  $OP'' > OP'$ , pero se perderá  $E''E_1''$  por unidad producida; a la larga sólo podría funcionar a base de una subvención del Estado, es decir, haciendo que los contribuyentes pagaran una parte del precio de coste.

b) Si es igual al de competencia  $OQ'$  la empresa producirá el máximo; así, si fuera posible fijar exactamente dicho precio, ésta resultaría la solución más antimonopolista. A ello se oponen, sin embargo, muchos obstáculos, de los cuales no es el menos impor-

tante la variabilidad de la curva de consumos en función del precio, es decir, de la curva  $I$ .

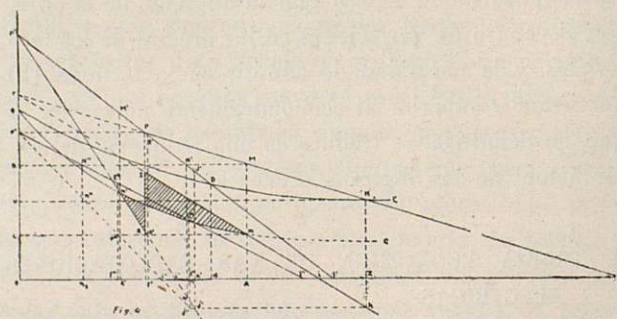
c) Si se fija entre el de competencia  $OQ'$  y el de monopolio  $OQ$ , la producción  $OP'''$  estará también comprendida entre las de ambos regímenes teóricos.

d) Si se establece igual al de monopolio  $OQ$  o superior a él  $OQ''$  la intervención resultará totalmente inoperante, a menos que este precio  $OQ''$  se establezca, no como máximo, sino como forzoso, y, en tal caso, se reducirá la producción  $OP''$  hasta un límite inferior a la de monopolio  $OP$ , sin beneficio para el usuario, que ha de pagar un precio más elevado, ni para la empresa, que ve reducidos sus beneficios en el pequeño triángulo rayado, igual a  $\int_{P_{iv}}^P (i-c) dx$ .

En la práctica, los precios se establecen con el carácter de máximos, y las empresas, que son las que proponen las tarifas, procuran en sus concesiones que sean superiores a  $OQ$ .

II. Como las dos principales aplicaciones de la electricidad —alumbrado y fuerza motriz— tienen costes de substitución muy distintos, y resulta fácil evitar que la corriente adquirida para el uso más barato se intente aplicar al más caro, las empresas eléctricas se hallan en inmejorables condiciones para elevar al máximo sus beneficios —y no necesariamente en perjuicio de la economía nacional— mediante la aplicación de precios discriminados.

Sean  $P'I'$  y  $P''I''$  las curvas de demanda, que para mayor sencillez supondremos rectas, o de precios medios de dos distintas aplicaciones de la electricidad, y  $P'i'$  y  $P''i''$  las curvas correspondientes de ingresos



marginales; la curva total de demanda será igual a la suma de las dos primeras, es decir  $P'PI$ , y la de ingresos marginales la  $P'RSi$ , ya que hasta el punto  $R$  coincidirá con la de la primera aplicación, y allí



b) Pero si la empresa aplica el precio  $OB = AM$  a toda su producción  $OA$  de monopolio con independencia del uso a que se destina, no obtendrá el máximo rendimiento económico de su explotación, pues de ella se destinarán  $On_1$  unidades a alumbrado y  $On_2$  a fuerza motriz, y como el ingreso marginal de esta última aplicación en el punto de equilibrio  $N''$  es  $n_2n'$ , muy superior al  $n_1n'$  —*negativo en este caso*— que corresponde a la producción para alumbrado en el punto  $N'$ , es evidente que podrán incrementarse los ingresos de la empresa desplazando algunas unidades

El caso estudiado es el más general y corresponde a aquél en que la producción de la empresa puede aplicarse indistintamente a ambos mercados, como ocurre cuando se dispone de un embalse de regulación anual. En las centrales sobre río, en las que no cabe modificar la cantidad de agua, el problema se simplifica extraordinariamente si se admite que la magnitud de la central ha sido decidida en consideración a una sola de las aplicaciones, y la otra que apro-



vecha la energía sobrante no ocasiona gastos suplementarios en la práctica, los ocasionará pequeños. El punto *i''* de ingresos marginales nulos nos dará la magnitud y el precio más conveniente para la segunda aplicación, pero no cabe duda de que cualquier precio positivo nos daría algún beneficio (figura 5).



En lo que afecta a la fijación oficial de precios intervenidos, debemos limitarnos a hacer las siguientes observaciones:

a) Si los precios fijados son superiores a los de monopolio discriminado, la intervención resultará inoperante o perjudicial, según se consideren como máximos o como únicos.

b) Si son respectivamente inferiores a los  $K'J'$  y  $K''J''$  de competencia discriminada, resultarán refinamente inadmisibles para la empresa, que trabajará con pérdida.

c) Cabe la posibilidad, que hay que estudiar en cada caso, de imponer un precio —en general, un número inferior al total— discriminado inferior al de competencia mediante adecuada compensación en el precio de los restantes mercados.

III. Como característica peculiar de las explotaciones eléctricas debe señalarse la imposibilidad práctica de proceder al almacenamiento, por lo menos en cantidad apreciable de la energía fabricada, lo que obliga a las empresas, si quieren mantener un buen servicio —y la regularidad en los servicios es factor que en tiempos normales pesa mucho en su crédito— a tener una potencia instalada por lo menos igual al mayor consumo instantáneo previsto, circunstancia que no se da en la mayoría de industrias cuyo almacén de productos fabricados desempeña el papel de volante regulador de la velocidad de fabricación.

Respecto a la posibilidad de almacenar primeras materias, las condiciones son distintas, según la clase de central que se considere; la situación peor corresponde a las centrales sobre río, donde tal posibilidad es totalmente nula, ya que el límite superior de la energía producida viene determinando no sólo por la potencia instalada, sino además por la cantidad de agua fluyente, y la mejor a las centrales térmicas en las que es teóricamente infinita y dependiente sólo de la capacidad de los depósitos de combustible y medios auxiliares; las centrales hidráulicas con regulación ocupan una posición especial, ya que si bien la capacidad embalse —y, por tanto, el almacenamiento de la primera materia agua— puede variar teóricamente entre límites muy extremos, en la práctica las consideraciones de carácter económico impondrán restricciones muy considerables a tales límites en este sentido cabrá distinguir entre embalses de regulación

diaria, anual o hiperanual, cada uno con sus problemas propios.

Otras características especiales de la industria eléctrica provienen del hecho de que en circunstancias normales las empresas deben hallarse en condiciones de suministrar en cada momento toda la corriente que les sea requerida, ya que si bien se hallan autorizadas para no contraer nuevos compromisos al tener agotada su capacidad, tal conducta no es en modo alguno recomendable, no sólo por dejar una puerta abierta a posibles competidores —quizás abastecedores de zonas próximas— al negar suministros a nuevos solicitantes, sino porque al no poder atender las solicitudes de ampliación de sus usuarios se expone a perderlos. Este problema, que reviste máxima gravedad por la imposibilidad de manipular las tarifas para reducir la demanda efectiva, presenta dos aspectos distintos que conviene considerar:

a) La extremada desigualdad de los consumos en las diversas horas del día, y en menor grado entre los diversos días del año; lo que determina que si llamamos  $x$  la relación entre los consumos máximos  $OM$  y medio  $Om$  de la explotación (fig. 6), la po-

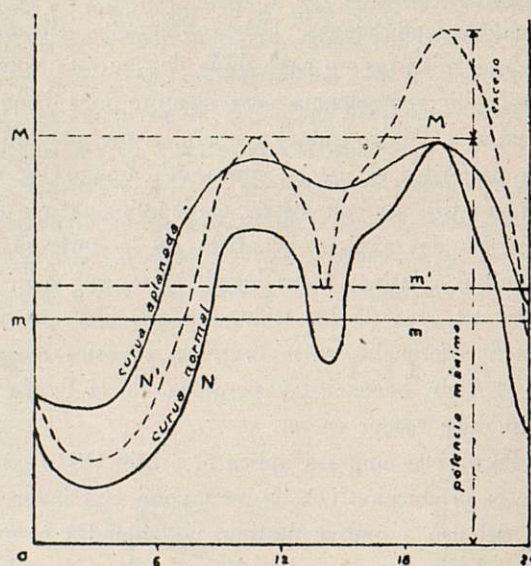
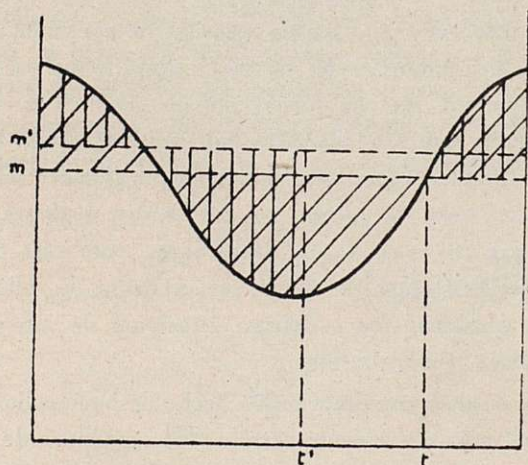


Fig. 6

tencia instalada deberá guardar, por lo menos, la misma relación con la potencia media, lo que determinará mayores gastos de instalación y, por tanto, de costes medios, a menos de establecer una discriminación de tarifas tal que si dicha relación es mayor que



En las empresas que disponen de centrales de varias clases: sobre río, con regulación y térmicas, así como la posibilidad de recibir suministros de otras empresas en determinadas condiciones, la rentabilidad de la explotación depende en gran parte de la adopción del régimen más conveniente, que sólo puede ser decidido en cada caso particular. Dado el interés que presenta el problema, ha sido objeto de estudios generales a los que nos referimos (1); pero nos interesa llamar la atención sobre el siguiente hecho concreto, al que no siempre se ha concedido la importancia debida: Cuando la demanda ha alcanzado una magnitud que rebasa la potencia total instalada,



**Fig. 7**

(1) Véase P. ROTH y A. FRAGA, *Organización de la producción y de la distribución en alta tensión de las redes eléctricas*. Madrid. 1943.

Fig. 8

457



### 3. CONSECUENCIAS APLICABLES A LAS RELACIONES DE LAS EMPRESAS ENTRE SÍ.

En los dos puntos que acabamos de exponer se han estudiado algunas cuestiones relativas a la economía de las empresas eléctricas. Sin duda alguna podrán achacarse al análisis efectuado los defectos de ser parcial —es decir, limitado a algunos aspectos concretos— y poco profundo, o sea no haber agotado todas las posibilidades que pueden presentarse en los casos concretos examinados; sin embargo, creo serán suficientes en cantidad y calidad para permitirnos extraer de ellos algunas consecuencias útiles.

a) Dijimos al final del § 2 que si resulta posible para una empresa adquirir energía de otra extraña existirá un determinado intervalo en que le saldrá más a cuenta proceder así que poner en marcha una nueva central propia; con lo que se quiere significar que le será posible aplazar sus planes de construcción de la nueva central hasta aquel momento en que teniendo en cuenta el período de tiempo que ha de durar su construcción, coincida su puesta en marcha con el punto de intersección E de la figura 8 —cinco años, por ejemplo, si la curva de consumos-tiempo prevista es RR de la misma figura—, aplazamiento que haría rentable la construcción de centrales que no lo serían en el caso contrario, ya que la línea EGF de la figura 1 se ha convertido ahora en la E'L'GF de mayor superficie rentable. Pero la posibilidad de adquirir energía extraña es cosa que no depende sólo de la voluntad de una empresa, sino de modo muy principal de que exista una empresa próxima —relativamente— que se la puede suministrar; es decir, que disponga de un sobrante de energía en aquel intervalo de tiempo.

Con toda seguridad la empresa extraña a que nos referimos con una curva de demanda de suministros análoga a la de la primera, y habrá que abordar los mismos problemas de suficiencia de producción. Incluso en el caso más desfavorable de que sus centrales se agoten a la vez, resultará favorable la coordinación de los planes de producción de ambas empresas, ya que en tal caso bastará con que construya una de ellas y, al revertir a la nueva central los excedentes de ambas empresas, se alcanzará antes el punto de equilibrio económico de esta última. Así, si suponemos que las dos empresas tienen curvas análogas de de-

manda, en la figura 8 la línea SR se convertirá en la ST, y en la 1 la EGF en la E''GF, que si bien inferior a la E'L'GF, es mucho más conveniente que la EGF correspondiente a la no coordinación, y la segunda empresa podrá retrasar sus planes hasta el momento en que los excedentes de ambas agoten las posibilidades de la nueva central construída por la primera. Las consideraciones efectuadas nos autorizan, además, para hacer constar que las ventajas de la coordinación aumentarán en razón de la magnitud de la nueva central que se haya de construir y la poca importancia de los consumos de cada empresa.

b) Consideremos ahora la cuestión desde otro punto de vista. En § 2, I. indicamos que el funcionamiento con costes decrecientes hace a las empresas eléctricas especialmente adecuadas para la formación de monopolios; en la práctica, la necesidad en que se hallan las empresas productoras de construirse sus propias redes de distribución, hace que estos monopolios tengan carácter regional, es decir, que las empresas nacidas para efectuar los suministros a zonas concretas de consumo elevado —por su mucha población o alta industrialización— han tenido a asegurarse el dominio de una determinada zona, y como éstas se hallan separadas por amplios espacios de consumos pobres, su suministro no ha dado lugar a luchas por su dominio, que no habría podido conducir a otro resultado que a la fusión de las empresas competidoras. Ciertamente es que tales monopolios regionales no se dan en toda su pureza, ya que existen regiones en las que coexisten varios proveedores, pero esas desviaciones del modelo suelen ser producto de influencias perturbadoras —defensa irracional de intereses creados, principalmente.

Al resultar esa situación de hecho de monopolio regional muy conveniente para la vida económica de las empresas, éstas se han visto obligadas para asegurarlo a estipular convenios de delimitación de zonas —generalmente con divisorias en regiones pobres— que guardan tanto más celosamente cuanto que se hallan en posición con el espíritu que informa la legislación eléctrica de libertad de consumidor para elegir el suministrador que estime más conveniente. A veces tales convenios incluyen la prohibición no sólo de distribuir, sino también de construir en las zonas de empresas extrañas; pero aun en el caso de



Supongamos dos empresas monopolistas en dos zonas próximas, que supondremos concentradas en los puntos A y B; la primera, con los saltos 1, 2 y 3, que abastecen ampliamente su mercado; y la segunda, con los saltos 4 y 5, agotados y en la precisión de construir; aunque el salto N resulte económicamente más ventajoso para la empresa B que el N', es muy probable que se vea obligada a ceder por el último (figura 9).

## II. EL PUNTO DE VISTA DE LA COMUNIDAD

I. Existe hoy absoluta unanimidad en admitir la necesidad de alguna limitación de la iniciativa privada al haberse comprobado que carecían de fundamento las afirmaciones de la Escuela clásica de que el libre juego de los intereses personales era el mejor



medio para aumentar el bienestar de una nación; incluso los más firmes defensores del liberalismo económico, basado en la propiedad privada y en la libre competencia, se hallan dispuestos a reconocer la necesidad de alguna intervención estatal, por lo menos en todas aquellas esferas que tienden a aumentar el respeto a la propiedad. Podrán protestar, si se quiere, contra todo aumento de impuestos y aun contra la mera existencia de éstos, pero exigirán la permanencia de un cuerpo eficiente de la Guardia Civil.

Precisamente la controversia se halla centrada hoy día, quizás debido a las exageraciones del sistema antes imperante, en el extremo opuesto: en sí debe permitirse en algunos campos el mantenimiento de la iniciativa privada. El problema ha sido objeto recientemente de bastantes estudios, pero aunque su discusión corresponde más bien al terreno político que al económico, existe cierto acuerdo entre los economistas de que en determinados ramos la iniciativa privada es insustituible; por nuestra parte admitiremos esta tesis sin detenernos en su demostración.

Respecto a aquellas ramas en que puede ser aconsejable una acción oficial, creemos que debe establecerse una separación:

A) Materias en que la intervención estatal es obligada. Por ser el hombre un ser social, es decir, un ser que necesita vivir en sociedad para conseguir su fin último de perfeccionar sus facultades que le han sido otorgadas, y por ser el Estado la institución política creada para organizar aquella necesidad, se comprende que la conservación de ese Estado —tanto contra los enemigos de fuera como contra los de dentro— ha de ser objeto previo a todos los demás, y que una vez conseguido aquél, el Estado ha de dirigir su actividad a que el hombre no destruya por sí propio sus facultades, ya que para facilitar el desarrollo de las mismas es precisamente para lo que el Estado ha sido creado. Estarán, pues, incluidas en este grupo las siguientes materias:

a) Defensa nacional. No hace falta insistir en su condición primordial, como la ubicación de las centrales eléctricas, puede hallarse determinada por la existencia de saltos adecuados o la proximidad de grandes yacimientos de combustible utilizable, este aspecto sólo puede afectar a la conveniencia de esta-

blecer un plan estratégico de centrales de reserva próximos a los grandes mercados consumidores, sobre todo si las primeras se hallan en lugares fácilmente vulnerables.

b) Defensa de la comunidad contra alguno de sus miembros. Desde el momento que las actividades económicas del hombre, como advirtió Pareto, pueden orientarse en dos distintas direcciones: 1.º la producción de bienes económicos; 2.º la apropiación de los bienes económicos producidos por otros, resulta necesario algún mecanismo para que se dirija con preferencia hacia la primera de ellas.

En general, el ordenamiento jurídico es el arma de que se vale la comunidad para defenderse contra esos apetitos desordenados; sin embargo, en ciertos casos la apropiación se da en una forma velada que dificulta la represión eficaz; v. gr., los monopolios que hacen pasar al monopolista, mediante una restricción artificial de la oferta, una parte de los beneficios que deberían corresponder a los consumidores. Vimos, sin embargo, en § 2, 1, que en las industrias con costes decrecientes —entre las que se halla, entre ciertos límites, la eléctrica— la existencia de un monopolio será ventajosa para el usuario siempre que el Estado intervenga mediante una fijación acertada de precios.

c) Defensa de un miembro contra sí mismo. A ella obedecen ciertos número de disposiciones de carácter mas bien moral; v. gr., la represión del uso de estupefacientes. En materia económica ofrecen poco interés; en general, la comunidad dispone de otras instituciones, por ejemplo la Iglesia, para conseguir este fin.

B) Materias en las que la intervención estatal es aconsejable. Sin participar del carácter de necesidad que posee la intervención estatal en las materias del grupo anterior, aquélla puede resultar conveniente en los siguientes casos:

a) Cuando puede existir oposición entre la finalidad estrictamente económica que persigue la empresa privada, y otra no económica que puede interesar primordialmente a la comunidad, aunque en ocasiones —y quizá por lo común— este interés no económico tendrá derivaciones que afecten directamente a la economía, la existencia de esta antinomia ha dado lugar a la mejor justificación de la Hacienda pública. Ejem-



plo típico de tales manifestaciones lo constituye la enseñanza: aunque, en ciertos casos puede estar a cargo de la iniciativa privada, en otros el Estado se verá obligado a cuidar de que pueda llegar a todos los ciudadanos —aun cuando económicamente no sea directamente rentable—, como medio que les permita desarrollar su personalidad; de rechazo, es muy probable que el aumento de cultura vaya seguido de una mejora en las condiciones materiales de vida de la comunidad.

En la política eléctrica que se haya de elegir, estas consideraciones deben pesar de modo considerable, ya que la corriente eléctrica es hoy en día un vehículo universal de cultura. En muchos casos las únicas horas que el labrador tiene libres para su ocio y sus lecturas son las nocturnas, y si el alumbrado eléctrico resulta hoy insustituible, más imprescindible es aún la electricidad para el goce de la radiodifusión. A nuestro juicio éste es el fundamento más decisivo para la campaña encaminada a conseguir que la corriente eléctrica llegue a todos los hogares, sobre la que nunca se insistirá bastante, ya que no es lo mismo ver los problemas desde una gran capital que goza teóricamente de suministro perfecto que desde una provincia como la de Lugo, en la que, por la dispersión de la población que encarece desorbitadamente los gastos de primer establecimiento, carece de luz eléctrica el 70 por 100 de sus habitantes. En otras provincias el problema no es, desde luego, tan notorio, aunque sí, en general, el de la calidad de la luz de que se dispone en los medios rurales.

b) Cuando puede existir contraposición entre la iniciativa privada y el interés de la comunidad, bien por ignorancia, como sería el caso del que fundase una industria que no tuviese la menor posibilidad de buen éxito, con lo que la comunidad perdería unos bienes que podrían haber sido dedicados a otros fines, bien por no coincidir los intereses de ambas partes; es decir, que aun siendo rentable la aplicación de determinados factores de la producción a un determinado objeto, el producto neto marginal social (1) aumentaría más si se hubieran dedicado tales factores a otra finalidad distinta.

(1) Sobre el concepto de producto neto marginal y su distinción en social y privado. Véase Pigu, *La Economía del Bienestar*, pág. 110 y siguientes de la traducción española.

Este problema, uno de los más delicados que actualmente tiene planteados la Economía, es el que ha dado origen a las diversas modalidades de Economía dirigida, y parece ser consecuencia de la moderna concepción de los conflictos internacionales en la libertad de guerra total, pues si puede considerarse admisible que la libertad económica haya de ser pagada al precio de un posible menor nivel de vida, un insuficiente aprovechamiento de los medios disponibles puede determinar, en caso de conflicto, el total aniquilamiento de la comunidad. En el próximo número examinaremos más detenidamente esta materia; por ahora, nos limitaremos a indicar que la unificación de empresas, defendida en el § 3, puede resultar un medio poderoso para reducir las contraposiciones que en la actualidad pudieran existir.

c) Cuando se trata de decidir una preferencia de tiempo, es decir, hasta qué punto los esfuerzos realizados han de ser repartidos entre los objetos de conseguir mejora en el actual nivel de vida o en el de algún período posterior, cuestión íntimamente relacionada con la dicotomía de bienes de consumo y bienes de capital. La actividad tiene siempre por objeto la producción, pero ésta puede ser más o menos inmediata —como la del artesano que confecciona unos zapatos—, o mediata la del fundidor que funde un metal con el que se construirá una máquina que fabricará zapatos; y es evidente que para una misma cantidad de trabajo todo aumento en una clase de actividad repercutirá necesariamente en una disminución de la otra.

En el caso particular de la energía eléctrica interesa resaltar la necesidad de que la capacidad de producción sea en cada momento la adecuada para satisfacer los suministros precisos para la buena marcha de la economía nacional. Me permito llamar la atención, sin embargo, sobre esta condición de «precios para la buena marcha de la economía nacional», ya que me extraña comprobar la unanimidad con que en una economía tan rígidamente contingentada como la nuestra se aceptan como convenientes las cifras de consumo actuales y futuras calculadas por extrapolación, sin la menor consideración crítica respecto a su necesidad. Pero este punto será tratado con detalle más adelante.

II. La mayor intervención del Estado en las ac-



tividades económicas, tan propias de nuestro tiempo, se basa en un supuesto que no siempre ha sido examinado con el detenimiento que merece: el de que el Estado conoce mejor que los particulares no sólo cuál sea el fin económico que conviene más a la comunidad, sino también los medios adecuados para llegar a él. Ya la primera parte —el fin que se desea— ofrece más dificultades de lo que a primera vista puede parecer, puesto que el que comúnmente se admite como tal, el máximo aprovechamiento de los factores de la producción, no sólo se presta a diversas interpretaciones por la heterogeneidad de los dos factores básicos —capital y trabajo— y la diversa importancia relativa que a cada uno se puede conceder y los problemas que suscitan las íntimas conexiones entre el último de ellos y el ocio, sino porque por ser la política económica una parte —y no siempre la más importante— de la política total del Estado, precisa investigar si existe contradicción o por lo menos fuertes fricciones entre aquella parte y el todo.

Pero más grave es la dificultad en la determinación de los medios idóneos para la finalidad que se persigue; el profesor de Torres, en reciente obra (1), se ha referido detenidamente a la concordancia o discordancia entre los efectos primarios y los inducidos de toda medida que afecte a la actividad económica, y ha señalado con acierto que en determinados casos la discordancia puede ser tan grande que los segundos logren anular y aun sobreponerse a los primeros, y cabe el peligro de que el asombro de los que tomaron las decisiones insuficientemente estudiadas ante el fracaso de sus medidas, se traduzca en el sentido de considerarlas insuficientes y reforzarlas cuantitativamente, agravando, también cuantitativamente, la precaria situación.

Sea cual fuere el criterio que se tenga sobre estas cuestiones, debe quedar firmemente establecidas dos condiciones primordiales para el buen éxito de una política económica:

a) El exacto conocimiento de los medios de que se dispone; aunque el factor psicológico puede influir considerablemente—y es misión del político su

compulsión—la parte fundamental hace referencia a hechos que se pueden contar y medir, por lo que a su expresión en cifras deberá concedérsele atención preferente. En este sentido es digna de encomio la labor que en favor de la Estadística se está realizando; aunque, por la imperfección de los medios de que el personal dispone los resultados obtenidos, hasta ahora no hayan sido siempre de la misma calidad, no cabe duda de que la experiencia adquirida puede dar magníficos resultados dentro de un lapso relativamente breve. En tema tan extenso me permitiré hacer dos indicaciones: la primera, relativa a la conveniencia de establecer un más íntimo contacto entre las Secciones provinciales, que, por su misión, han de tener conocimiento de la realidad más real —si se me permite la palabra— que la de los funcionarios de aquella, y la segunda, que exige el previo cumplimiento de la primera, la de que en toda estadística publicada debería figurar una nota sobre el criterio seguido en su confección y la estimación aproximada del valor que merecen los resultados obtenidos. La inseguridad que, a pesar de su evidente mejora, ofrecen aún algunas veces, puede resultar tanto más peligrosa cuanto que por no ser posible comprobar la oportunidad de determinadas disposiciones de carácter económico más que mediante la medida estadística de sus resultados prácticos —y aun ello bajo la pesadilla constante de la cláusula del *coeteris paribus* tan difícil de conseguir—, una imprecisión en los datos recogidos podrá determinar la permanencia prolongada de disposiciones perturbadoras que sería conveniente eliminar.

b) Obtenido el conocimiento de los medios de que dispone, procede la determinación de las medidas más idóneas. Es esta materia a la que el profesor Torres concede gran atención, insistiendo en la necesidad de que los políticos dejen su determinación a los economistas, y fijando, como misión de los primeros, la de señalar los fines y, como labor de los segundos, la de precisar los medios más adecuados para alcanzarlos, de acuerdo con los datos estadísticos de que se disponga. Según el citado profesor, del mismo modo que el político, cuando ha decidido la construcción de un puente transfiere al ingeniero la tarea de su cálculo y realización, debería ceder su

(1) *Teoría de la Política Social*. Ed. Aguilar.



puesto al economista una vez señalados los fines económicos que se propone realizar (1).

A mi juicio, este criterio, aun conteniendo una gran dosis de verdad, peca de exageradamente moderado, y debería ser llevado a su última consecuencia lógica, ya que, si en las cambiantes circunstancias actuales para decidir entre las diferentes medidas un estudio teórico del problema, la decisión puede llegar cuando aquellas circunstancias hayan cambiado de tal modo que la solución, incluso en el caso de ser acertada, no dé los resultados apetecidos y su fracaso arrastre el crédito de la ciencia económica que tantos embates ha tenido ya que resistir. La solución más lógica parece, pues, debería consistir en que el político fuera a la vez técnico en la materia, lo que le permitiría añadir a la rapidez en las decisiones —condición especial de muchas situaciones económicas— la garantía de acierto en las mismas que proporcionaría su formación intelectual.

En cambio, no puedo hallarme en completo acuerdo con el criterio sostenido por el mismo autor, de que la industrialización de España no debiera, ser obra de los ingenieros, sino de los economistas, debido a que la formación profesional de aquellos es demasiado cerrada para permitirles ver el problema en su conjunto y conceder el debido valor a los efectos secundarios, perjudiciales quizá para la economía nacional, de las medidas adoptadas para favorecer el desarrollo industrial. Porque, aun habiendo parte —quizá demasiada parte— de verdad en esa opinión (2), la lógica sugiere que, puesto que, así como la técnica está al servicio de la economía, esta última presupone a su vez el conocimiento de la primera, antes de proceder a una decisión concreta entre ambas especialidades se examinen atentamente las alternativas posibles y la probabilidad de corregir las lagunas que cada una de ellas ofrezca: esto es, investigar si los economistas puros se hallan en condiciones de dar el de-

bido valor a las dificultades técnicas que ofrece la industrialización española, y una vez dado como hecho cierto el de que, en general, los técnicos carecen de suficientes conocimientos económicos, y los economistas de suficientes conocimientos técnicos, considerar cuál de los dos vacíos resulta más fácil de rellenar. Por nuestra parte, concedemos tal interés a esta materia, que estimamos de todo punto necesaria la intensificación de los estudios económicos entre los ingenieros, que podría tener lugar, por ejemplo, en la forma de cursillos para los que aspiren a ingresar al servicio del Estado y, por lo menos, a ocupar determinadas plazas de responsabilidad en el mismo.

## 5. INICIATIVA PRIVADA O EMPRESA PÚBLICA.

I. En el número anterior pasamos revista a una serie de razones que determinan una limitación del ámbito de la iniciativa privada y abogan por una expansión de la intervención estatal, pero sin hallar ningún argumento decisivo para la substitución total de la actividad económica de los particulares por la del Estado, a menos que se demuestre como imposible la consecución de los fines propuestos mediante cambios en las instituciones jurídicas que no afecten a la estructura económica fundamental de la nación: desde aquel punto de vista su interés sería, por tante, puramente académico y apenas han sido esgrimidos por los partidarios de la estatificación.

Los defensores de esta última se apoyan principalmente en otras razones, de carácter sociológico, unas, y económicos, las demás. Entre las primeras, se destaca de modo preferente la que hace referencia a la justicia social: la substitución de la iniciativa privada por la empresa pública, es decir, la estatificación de la producción, habría de tener como consecuencia inmediata menor desigualdad en la situación económica de los diversos miembros de la comunidad, lo que se supone habría de contribuir a su perfeccionamiento. Como se observa, ésta es una tesis de carácter social que ha de resolverse en gran parte mediante un juicio de valor, es decir, de subordinación de fines; su análisis económico presenta las siguientes dificultades:

a) Admitida una mayor igualación de las riquezas, sería preciso estudiar si, a consecuencia de la estatificación, la riqueza media aumentaría, permaneciendo

(1) Véase el prólogo del citado autor a la traducción española de la *Economía sin paro forzoso*, publicada por el Instituto de Estadística de la Universidad de Oxford.

(2) La única obra que conozco en que un ingeniero se propone estudiar seriamente las posibilidades de la economía española dedica en su primer tomo —único publicado hasta ahora— a la exposición de relaciones fundamentales, pero prescinde de examinar si nuestras circunstancias son análogas a las de los países en que han sido comprobadas. Me refiero, claro está, a la obra de A. ROBERT, *El Mañana económico de España*, indispensable, a pesar de ello, a todo el que quiera profundizar en esta materia. Pág. 29, Apartado A.



cería constante o disminuiría, y, en este último caso, si la riqueza mínima individual tendería o no a aumentar, y en la primera hipótesis, si tal aumento debería considerarse suficiente compensación para la disminución de la riqueza media, consideración que evidentemente tiene un contenido de caracteres totalmente extra-económico.

b) La posibilidad de que la preferencia de tiempo de la comunidad quedara afectada por la estatificación, obligaría a extender el análisis anterior a momentos sucesivos. Si se diera una coincidencia de tendencias en los casos a) y b), el juicio económico de la estatificación sería factible; en caso de discrepancia sería preciso formular un nuevo juicio de valor sobre la preferencia de tiempo, lo que volvería a situarnos fuera del campo estrictamente económico.

c) Dada la dificultad de formular exactamente todas las condiciones que pueden influir en la conducta económica de los hombres, sería indispensable, para obtener un resultado cierto, efectuar el estudio desde un punto de vista puramente experimental mediante la comparación de los efectos obtenidos en dos comunidades que en el origen del experimento se hallaran en las mismas condiciones; la imposibilidad de hallar dos comunidades tan análogas determina que los resultados obtenidos en comunidades distintas no sean directamente comparables e induzcan a errores de apreciación. En la práctica, los argumentos de un supuesto carácter objetivo que hoy día se emplean por ambas partes deben ser considerados también en gran parte como meros juicios de valor.

II. Dado el poco interés económico que ofrece la tesis de la igualación de riquezas, la razón de que concedan tanta importancia los economistas al problema de la estatificación de la industria, hasta el punto de constituir una de las ramas más actuales de la controversia económica, se debe al fenómeno casi mundial del sub-empleo, es decir, de la falta de ocasiones suficientes para satisfacer los deseos de ocupación en las condiciones vigentes para la remuneración del trabajo. Este fenómeno presenta dos aspectos, que examinaremos sucesivamente.

a) La economía de la competencia perfecta tiene por base la tesis de que el mecanismo del mercado y de los precios consigue automáticamente que todos los

recursos disponibles se apliquen a las finalidades más reproductivas; es decir, más apetecidas por la comunidad. Tal hipótesis, desde luego, no ha sido admitida nunca con todo rigor, pero se suponía que, de no sobrevenir perturbaciones económicas o técnicas, existía una tendencia al equilibrio, suficiente para hacerla prácticamente aceptable.

Los autores clásicos no se dieron cuenta, sin embargo, de que presenta un defecto fundamental: Cada empresario formula sus planes, de acuerdo con sus esperanzas respecto de los precios que han de regir en el mercado para los productos de fábrica en el momento en que se hallen dispuestos para la venta, pero, como tales precios dependerán en su día, tanto de la demanda como de la oferta, y ésta, a su vez, de la producción que hayan efectuado los demás empresarios, nos hallamos dentro de un círculo vicioso del cual no podremos salir más que obligando a cada empresario a hacer públicos sus planes para conocimiento de los demás o, aun mejor, haciendo que estos planes queden sujetos a aprobación estatal. Y ambas modalidades significan tan severas limitaciones de la iniciativa privada que pueden echar abajo todas las ventajas que, indudablemente, ha venido demostrando poseer el sistema.

De no procederse así, y cada vez más, a medida que se extienden los métodos indirectos de producción, la agravación del ciclo económico —es decir, de las alternativas de prosperidad y depresión, con su secuela de paro forzoso— es inevitable. En los períodos de auge, y ante la persistencia de la demanda, los empresarios se sienten dispuestos a ampliar sus fábricas por estimar que una producción superior les proporcionaría mayores beneficios; pero, como normalmente, los períodos de prosperidad suelen ser generales y todos los empresarios tener análogas iniciativas, al cabo de algún tiempo la capacidad de producción se ha hecho tan elevada que rebasa la demanda, los precios no son ya los que se esperaban, los empresarios no obtienen el beneficio que preveían y son presa del pesimismo para el futuro que los induce a disminuir el volumen de sus planes despidiendo obreros y creando paro forzoso. En especial, suprimen totalmente la adquisición de maquinaria nueva y pueden llegar a aplazar las reparaciones y la reposición de la existente, lo que determina que la depre-



sión se acentúe en las industrias productoras de bienes de capital que en su caída arrastran a las demás.

b) Como la irregularidad de las inversiones es una de las causas determinantes de las crisis, parece que una mayor regulación de las mismas podría ser suficiente para eliminarlas o, por lo menos, reducir su intensidad hasta hacerlas socialmente inofensivas. La experiencia de los años transcurridos entre las dos guerras mundiales se ha encargado, sin embargo, de demostrar la falacia de tal hipótesis, ya que, ante el asombro de la mayoría de economistas se ha comprobado que el paro forzoso se había hecho endémico y que, incluso en las épocas de mayor prosperidad, por ejemplo, en 1929, el número de obreros en paro forzoso en los países fuertemente industrializados no había podido reducirse a cifra inferior al 10 %. No quedó más remedio que encarecerse con tal estado de cosas: los resultados obtenidos son, precisamente, los que han determinado la actualidad de las controversias sobre estatificación. En resumen, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

Para que los productos obtenidos puedan ser adquiridos por los consumidores —condición previa para que los empresarios fabriquen otros nuevos—, es preciso que aquellos gasten todo el dinero que han recibido por colaborar en la producción; si retienen alguno en su poder, automáticamente quedarán sin colocar productos por un valor igual al dinero retenido. Desde luego, no todo el mundo gasta todo el dinero que adquiere, por lo que parece deberíamos hallarnos siempre en este caso, pero, como el dinero ahorrado suele invertirse en valores o en cuenta corriente de un Banco que se encarga de invertirlo por su cuenta, vuelve así a poder de los empresarios que lo utilizan en nuevo ciclo de producción.

El mecanismo encargado de equilibrar los ahorros con las inversiones —condición indispensable para que el sistema funcione bien— había de ser la tasa de interés: en caso de déficit de los primeros, aumentaría esta tasa, con lo que se estimularía su creación y se reducirían las inversiones; en caso de superávit, el equilibrio se conseguiría por la vía contraria. Las circunstancias de elevada tasa de interés y gran seguridad política que dominaban cuando los economistas clásicos expusieron su hipótesis, los indujeron a no prestar atención a un hecho que, sin duda,

conocían perfectamente: el riesgo y las molestias que toda operación de préstamo lleva consigo hace que los ahorradores no quieran ceder su dinero a tasa de interés excesivamente baja.

Mas, las circunstancias cambiaron, y la catástrofe se produjo: Por una parte, la elevación del nivel medio de ingresos determinó un aumento considerable de las cantidades que la comunidad deseaba ahorrar; por otra, la época de progreso técnico que exigía grandes inversiones terminó; por fin, la mayor inseguridad política hizo al capital más receloso; en consecuencia, la tasa de interés que habría podido restablecer el equilibrio entre ahorros e inversiones resultó inferior a la que los prestamistas consideraban como mínima para compensar el riesgo del préstamo: había aparecido el desembolso crónico. Y, dado que el paro se originaba por un déficit en las inversiones, el Estado había de intervenir para tomarlas a su cargo: he ahí la más fuerte justificación económica de la dirección estatal de la economía.

III. Si aplicamos ahora lo expuesto al caso particular de la industria eléctrica comprenderemos el insospechado valor de la conclusión deducida en § 3 de que «desde el punto de vista de los costes de explotación sería ventajoso para las empresas eléctricas proceder a su unificación», puesto que si toda la producción de energía se hallara concentrada en una sola mano, desaparecería automáticamente la falta de coordinación señalada como una de las razones más idóneas para justificar una estatificación. Desde este punto de vista, el dilema «iniciativa privada o estatificación» se convierte en este otro «empresa única o estatificación»; modificación de transcendental importancia si, por razones extraeconómicas, se considera aconsejable la iniciativa privada.

Resta, sin embargo, el argumento de la preferencia de tiempo: es decir, del ritmo de construcción de bienes de capital. A nuestro juicio, tampoco en la industria eléctrica posee gran valor, por lo menos, mientras los consumos sean crecientes y los aumentos presenten cierta regularidad; circunstancias que hoy por hoy se dan en ella. No parece tarea difícil escalar las nuevas construcciones de modo que su máxima intensidad coincida con los períodos de depresión, ayudando así a rellenar los baches en la ocupación por el paro en otras industrias; incluso desde el pun-



to de vista estrictamente económico podría tal medida resultar aconsejable, ya que los intereses intercalados devengados por el adelanto de las construcciones sobre las necesidades que un ritmo discontinuo exigiría para no caer en estrangulamientos al final de los auges, podrían muy bien hallarse compensado por los menores precios de los factores constructivos durante los períodos de depresión.

Hemos eliminado, pues, para la industria eléctrica, dos de los argumentos más poderosos que se esgrimen en favor de la estatificación de la economía; resultado que constituye justificación suficiente del detenimiento con que hemos procedido a su análisis. Con la misma objetividad hemos de reconocer ahora que existe en ella una particularidad que la hace especialmente indicada para que su explotación corra a cargo de la comunidad: nos referimos al problema de las tarifas, de cuya fijación depende la marcha económica de la Empresa. Los argumentos esgrimidos son de tal peso que ya en pleno dominio del liberalismo económico su estatificación era defendida por bastantes autores.

No es propio de este lugar hacer una exposición detallada de las teorías en que se apoyaban sus partidarios; en rigor, se reducían a la manifiesta incompatibilidad existente entre la necesaria libertad de toda empresa industrial para modificar el precio de venta de sus productos, de acuerdo con las circunstancias del mercado, y la necesidad, no menos real, de que tales precios se fijaran en el momento de la concesión —garantizando, al menos, a las empresas contra una reducción forzosa de los mismos— para que el capital privado hallase estímulo y seguridad suficientes para inducirlos a la inversión. Desde entonces, esta oposición no ha hecho más que agravarse. Si en la época del Estado neutro el interés de las tarifas radicaba únicamente en su influencia sobre el volumen de los beneficios, hoy día, cuando los Estados precisan tener política económica y al ser las tarifas de energía eléctrica arma eficazísima para efectuar discriminaciones locacionales o específicas en el desarrollo industrial del país —con vistas quizá a obtener finalidades de carácter extraeconómico—, una flexibilidad en las tarifas aparece casi como indispensable. Y no hace falta insistir en las dificultades que cualquier modificación de las mismas plantea en un régimen de

iniciativa privada: la gestación de la que se halla actualmente en trámite, es ejemplo de suficiente valor probatorio.

La posibilidad de una mayor flexibilidad de las tarifas es tan decisiva en favor de la iniciativa pública que, para ser contrarrestada, ha sido preciso recurrir a otro argumento que no le va a la zaga en materia de incontrastabilidad: el de la mayor eficiencia de la empresa privada sobre la pública; argumento que no debe interpretarse necesariamente como afirmación de un menor sentido de la responsabilidad en el burócrata que en el empleado de la empresa particular, ya que el menor rendimiento en la explotación oficial de una industria puede tener profundas raíces de origen estructural. Aun a riesgo de caer en la paradoja, diremos que el hecho de que las sociedades anónimas suelen hallarse bajo la influencia de un grupo financiero con fines bien definidos, les permite, a pesar de su estructura, en apariencia, tan democrática, un manejo de sus asuntos mucho más autoritario que a las empresas públicas, incluso en los regímenes totalitarios, ya que la coincidencia total que en materia política se da en los componentes del partido único puede no tener lugar en el orden de las decisiones económicas normales. Además, como los funcionarios han de hallarse en todo momento en condiciones de poder remitir a la Superioridad informes «razonados» sobre las decisiones tomadas en los asuntos de su competencia, es lógico que se vean obligados a prescindir en su actuación de las intuiciones que han sido causa de tantos buenos éxitos en las empresas privadas.

La oposición aparece, pues, como definitiva, y los esfuerzos que se hagan para superarla condenados de antemano al fracaso, sobre todo, claro está, si prescindimos del hecho de que el ingenio humano ha sabido crear fórmulas de conciliación que han demostrado prácticamente su eficacia. Nos referimos a las empresas mixtas tipo CAMPSA, con participación privada mayoritaria; administración de empresa privada y derecho de veto en el representante del Estado; el peligro que para el capital privado puede representar esa arma tan poderosa se halla muy disminuido por la misma circunstancia que aparecería, precisamente, como el mayor inconveniente en la gestión oficial de las empresas: la necesidad para el funcionario que la tiene en sus manos de poder dar en



todo momento un informe «razonado» sobre los motivos que lo han inducido a aplicarla, razón suficiente para reducir su intercesión a aquellas decisiones evidentemente onerosas para la comunidad o contrarias a la política general del Estado. No creemos equivocarnos en nuestra convicción de que la solución habrá de venir algún día por ese camino (1).

## 6. LA PLANIFICACIÓN ELÉCTRICA.

I. El hecho repetidamente observado en estos últimos tiempos de insuficiencia de la oferta de energía eléctrica en relación con la demanda, ha determinado el unánime convencimiento de la necesidad de confeccionar un plan de construcción de nuevas centrales para satisfacer las exigencias de la demanda de energía. Aun a sabiendas de que mi criterio se halla en oposición con el corrientemente admitido, me permito asegurar que tal opinión significa una exposición muy simplista del momento económico nacional. Así, hemos podido leer en publicaciones oficiosas que la falta, en 1949, de 400 millones de kw.-h., debida a la excepcional sequía, había ocasionado a la economía española una pérdida de 1.600 millones de pesetas, por calcularse en 4 pesetas la pérdida originada por la falta de cada kw.-h.; si tal afirmación fuera cierta, debería poder asegurarse con igual fundamento que el exceso de 4.000 millones de kw.-h. sobre los producidos en 1935 había representado una mayor riqueza de 16.000 millones de pesetas (2) sobre la de aquella fecha, a menos —claro está— que se nos dé algún argumento para convencernos de que los únicos kw.-h. capaces de producir riqueza son los que no pueden aprovecharse.

Las cosas ocurren de modo muy distinto: nadie duda de que una mayor producción de energía es susceptible de ocasionar mayor renta nacional que otra menos elevada, pero nadie debería tampoco dudar de que tal renta depende en gran parte del modo como se administra la energía disponible, por lo que una solución que no tuviera en cuenta más que el primer aspecto del problema sería sólo parcial y podría llegar a ser peor que ninguna solución si se persistiera en

considerarla como tal, la planificación eléctrica no debe ser estudiada aisladamente, sino como una parte —muy importante, desde luego, pero sólo una parte— de la planificación económica total, y aun con la salvedad de que esta planificación económica total puede hallarse supeditada, a su vez, a consideraciones extraeconómicas —políticas, militares, culturales, o a las que se estime conveniente conceder atención preferente.

Por tanto, antes de proceder a una planificación eléctrica deberíamos plantear el problema de la planificación económica general, por lo menos, en el grado preciso para tener una idea suficientemente aproximada de las cantidades y los lugares de consumo de energía en los distintos períodos sucesivos de tiempo. Luego, en un segundo tanteo, sería preciso establecer la compatibilidad de ambas planificaciones; es decir, investigar si las construcciones necesarias para asegurar los suministros requeridos —y que exigen el empleo de ciertas cantidades de factores— no harían retrasar la ejecución del plan general previsto. Un tercer tanteo nos ayudaría a pulir los resultados, etcétera.

En definitiva, el problema de la planificación económica consiste en conseguir la óptima utilización de los recursos de que un país dispone; en un sistema de mercado libre esa óptima utilización coincide con el máximo valor monetario de los productos finales obtenidos, pero en los sistemas de precios intermedios es preciso atender a las cantidades reales de los productos, lo que da lugar a problemas secundarios de equiparación entre las diversas clases y calidades. Dentro de la parte eléctrica del plan, los diferentes usos a que la energía puede ser destinada suponen nuevas complicaciones, ya que, por ejemplo, la determinación del valor relativo a la empleada para mover un telar, presupone la resolución de un juicio de valor, es decir, supedita la resolución de un problema económico a otro no económico. Lo mismo ocurre en la equiparación de la corriente para usos industriales distintos: el trato de favor de que goza, por ejemplo, la gran industria electroquímica en la aplicación de recargos por energía térmica en la tarificación presupone la adopción de un criterio discriminatorio; sin que, con ello, se quiera indicar que se considere tal preferencia irracional, sino, antes bien, que, en caso de esti-

(1) Para más amplio estudio de la naturaleza y posibilidades de esta clase de empresas. Véase J. Girón, *Las Sociedades de Economía Mixta*.

(2) En realidad una cifra mayor, por la utilidad marginal decreciente de los bienes.



marse necesaria, debería exponerse con toda sinceridad para que las medidas diferenciales en su favor llegaran hasta donde fuere preciso llegar.

Porque parece nos hayamos olvidado de que la circunstancia de que los servicios públicos se hayan explotado siempre con número reducido de tarifas prefijadas los ha integrado fuertemente dentro de la economía clásica de la igualdad de oportunidades en cuanto a los usuarios comprendidos en una misma tarifa. No hay duda —por lo menos no existe esta duda entre los economistas actuales— de que un servicio público explotado en régimen de verdadero monopolio daría lugar a dificultades por parte de los consumidores que se hallaran en situación contractual inferior, pero esa realidad no constituye ninguna característica especial de los servicios públicos, sino antes bien, forma la esencia misma del régimen tan corriente de monopolio o competencia monopolista, podría obviarse en gran parte mediante adecuada discriminación de los consumos por las empresas, y quizá sería conveniente examinar con un poco más de atención si desde el punto de vista económico, una aplicación racional de tal sistema contribuiría realmente a disminuir en algún modo la renta nacional, sobre todo, si se tiene en cuenta que la aplicación racional ha de confrontarse con la situación actual de discriminación según grandes grupos de consumos, sin la necesaria flexibilidad por parte de las empresas para modificar sus tarifas en sentido ascendente, para aplicaciones de débil utilidad social.

II. Dadas las características peculiares de la industria eléctrica, derivadas de utilizar primeras materias de imposible o difícil transporte, la localización de los centros productores de energía viene determinada por la ubicación de aquéllas, por lo que la formación de un catálogo de disponibilidades constituye la pieza fundamental de la planificación eléctrica; ello no deberá permitir, sin embargo, perder de vista la necesidad de instalar centrales de seguridad en el servicio como por conveniencias estratégicas.

Para que el catálogo sea realmente útil, deberá ser efectuado en términos de costes de sustitución, es decir, habrá de indicar tanto la clase y cantidad de cada uno de los factores precisos para la construcción de las nuevas centrales como sus posibles utilizaciones alternativas; requisitos indispensables para decidir

acertadamente sobre la conveniencia de su establecimiento. Deberá atenderse, en particular, a los siguientes extremos:

a) Para las centrales térmicas, la posibilidad de utilización del carbón para otros usos industriales. Ello dará preferencia, *coeteris paribus*, a la utilización de aquellos combustibles difícilmente aprovechables para otros usos como los menudos, o de potencia calorífica tan escasa que su transporte hasta las zonas consumidoras resulte antieconómico. Pero una vez agotadas estas posibilidades —o bien, si razones de otro orden las hicieran inadecuadas para la producción de energía— no debe cerrarse la puerta de un modo absoluto al consumo de carbones de buena calidad: sobre todo si el empleo de la energía así obtenida permite ahorrar una cantidad de carbón de la misma calidad suficientemente mayor para compensar los gastos que su conversión en electricidad supone. En muchos casos, como en la tracción o las aplicaciones térmicas, la posibilidad de sustitución aparece inmediatamente, pero no debe olvidarse que puede tener lugar por vía indirecta; así, el carbón para gas del alumbrado puede ser substituído por la energía eléctrica aplicada a los mismos fines a que se dedicaba el gas.

b) En las centrales hidráulicas, la materia fundamental es el agua, y el agua puede tener en ciertos casos otra aplicación muy interesante: la creación de regadíos. Desde luego, el coste de sustitución podrá variar entre límites muy extensos, ya que dependerá no sólo de la posibilidad específica de crear regadíos con el agua de cada salto, sino de la calidad de esos regadíos y del interés que se conceda en cada país a la obtención de mayor cantidad de productos agrícolas. En casos extremos podrá llegar a ser conveniente el consumo de grandes cantidades de energía en la elevación de agua para riegos.

Si las centrales hidráulicas se instalan en ríos de corriente muy variable, será preciso construir grandes presas que requerirán elevadas cantidades de cemento. Pero el cemento puede aplicarse también a otras finalidades; por tanto, en el caso de existir insuficiente capacidad de producción será preciso estudiar el costo de sustitución del cemento de la presa proyectada; además, su fabricación exige carbón que podría emplearse para otros usos. Será preciso, por tan-



to, coordinar el plan de construcción de centrales hidráulicas con los planes de todas esas otras ramas industriales.

c) Sea cual fuere la clase de central que se construya requerirá maquinaria muy delicada, que, si puede construirse en el país, ocupará mano de obra especializada y máquinas útiles, y, si se importa del extranjero, exigirá divisas, para cuya obtención podrá ser necesaria la exportación de otros productos nacionales. Vemos, pues, que cualquiera que sea el camino que se adopte, la coordinación de la planificación eléctrica con la general de la Nación será condición inexcusable para el buen éxito de ambas. Más aún, como la energía producida no constituye un fin en sí, sino un medio para la consecución de otros fines mediante su empleo, será preciso considerar los costes de sustitución de su transporte hasta los centros de consumo, ya que las líneas necesitan cobre o aluminio, y que tales materiales pueden ser más o menos escasos; en todo caso habrá de resolverse el equilibrio entre secciones grandes con pérdidas pequeñas, y secciones pequeñas con pérdidas superiores, que, a su vez, originan la necesidad de instalar mayor potencia en centrales, con sus subsiguientes costos de sustitución.

Indicaremos, por último, una circunstancia a la cual no se ha prestado hasta ahora la atención que merece: las pérdidas y los costes de sustitución de las líneas de transporte serán tanto menores cuanto más próximos a las centrales se hallen los centros consumidores. Esta consideración, junto con las derivadas de fines de otro orden —de una distribución locacional, por ejemplo, que se estimara preferible (1)—, debería ocupar, a nuestro juicio, lugar importante en la política industrial de un país. Así, no debería permitirse en zonas deficitarias, a menos que razones poderosas así lo aconsejaran, la instalación de plantas consumidoras de grandes cantidades de energía, ni aun en el caso de disponer de salto propio, ya que éste podría muy bien aplicarse a la disminución del déficit existente.

III. Cuando la planificación económica de un país ha alcanzado su total desenvolvimiento, es decir, cuando no existen en el mismo más actividades económicas

(1) Véase el ensayo del autor sobre *Los factores distributivos en la industrialización española*, donde se trata por primera vez en nuestro país el estudio de este tema.

que las que han sido acordadas por el organismo encargado de concretar la voluntad de la comunidad, la planificación eléctrica podría hallarse limitada a la aprobación de un escalonamiento temporal en la construcción de nuevas centrales y líneas. En la práctica, tal circunstancia se da en muy pocos países, y lo normal es que la iniciativa privada siga teniendo primordial importancia, por lo que, si se desea disponer de energía suficiente para las finalidades de carácter preferente, se habrá de optar entre la construcción de un número de centrales suficiente para atender a toda la demanda previsible, y algún modo de regulación del consumo de energía para evitar que los consumidores ordinarios se apropien de la que se considera preferible aplicar a aquellos fines.

La primera solución significa, sin embargo, un absurdo, por hallarse en el camino opuesto a la más elemental consideración de lo que constituye una planificación económica: la óptima utilización de los recursos de un país. Porque, si en ella se han tenido en cuenta sus necesidades preferentes, el exceso de consumo de energía habrá de destinarse a la satisfacción de necesidades que no tengan tal carácter, entre las cuales figurarán seguramente algunas de utilidad muy relativa, y como este mayor consumo presupone mayor potencia instalada, y ésta, a su vez, un mayor consumo de factores productivos, será preciso retirar tales factores de otras finalidades más importantes, y eventualmente de algunas que se había considerado preferentes al formular el plan económico. En definitiva, significa un empobrecimiento del país.

La regulación del consumo de energía podría efectuarse mediante una contingentación de la misma, es decir, mediante la asignación de cupos a los consumidores en razón del interés de la comunidad en la clase de actividades a que aquéllas se dedican. En la práctica, sin embargo, ello constituye otro absurdo, porque, si se admite la conveniencia de mantener la iniciativa privada en una parte considerable de la actividad económica —hipótesis dentro de la cual nos movemos—, la adopción de tal medida significaría realmente la negación de la hipótesis; con la agravante de que, al efectuarse la planificación económica total que esa contingencia llevaría aparejada de modo indirecto —quizás por la falta de datos suficientes para abordarla de frente—, se tendería a no prestar atención a las responsabilidades que implica y a los perjuicios



que pueden derivarse de una regulación poco afortunada.

La regulación por medio de tarifas discriminatorias, según la aplicación de la energía, ofrece las ventajas de conservar el espíritu de competencia al situar a todas las empresas en análogas condiciones para la obtención de cualquier producto —condición indispensable para estimular el progreso técnico—, y constituir arma poderosa para intervenir la estructuración económica del país mediante la concesión de tarifas inferiores para aquellas actividades consideradas preferentes a cambio de un recargo en aquellas otras menos necesarias. Sin entrar en la discusión detallada de esa tesis, creemos interesante hacer ver la contradicción existente entre la campaña a favor de la electrificación rural y el hecho de que en estas zonas la energía suela facturarse a precios superiores a los de las grandes urbes. Por ser el consumo una función inversa del precio, siempre será factible, mediante el establecimiento de tarifas adecuadas, que las cantidades globales de energía que se destinen a las diversas finalidades sean del orden deseado; sobre todo si, al contrario de lo que ocurre hoy día, tales tarifas son *crecientes*, es decir, que dentro de cada modalidad aumenten a medida que van aumentando los consumos.

Esta última condición no sólo se halla de acuerdo con la naturaleza de las cosas, ya que siendo lógico que las centrales nuevas resulten más caras que las antiguas —por el interés que habrá existido en construir primero las más económicas—, también lo ha de ser que los consumidores en exceso, que son los que obligan a construirlas, paguen más que los pequeños, sino que es premisa necesaria para conseguir una previsión aceptable de los consumos. Así, si en la figura 11 representamos por  $Ca$  la curva de coste de corriente por unidad de producto obtenido y por  $Cb$  la del conjunto de los otros costos, como ésta será, probablemente, decreciente, si la primera tiene una forma  $Ca_1$  que también lo es, nos dará una resultante  $CT_1$  de igual clase, cuya intersección con la curva de rendimientos marginales  $R$  de la industria variará para pequeños desplazamientos de esta última, desde  $A$  hasta  $B'$ , y el consumo de energía desde  $Oa$  hasta  $Ob'$ . En cambio, una tarifa creciente como la  $Ca_2$  nos dará una curva de costos totales  $CT_2$ , cuya intersección con las  $R$  sólo originará desplazamientos de los consumos desde  $Oa$  a  $Ob''$ .

Al mismo resultado se llega al analizar la estructura del consumo de energía para usos domésticos: si la electricidad es en primer lugar vehículo de propagación de la cultura por su empleo en el alumbrado y los receptores de radio para pasar luego a ser un medio de creación de comodidades, como para la

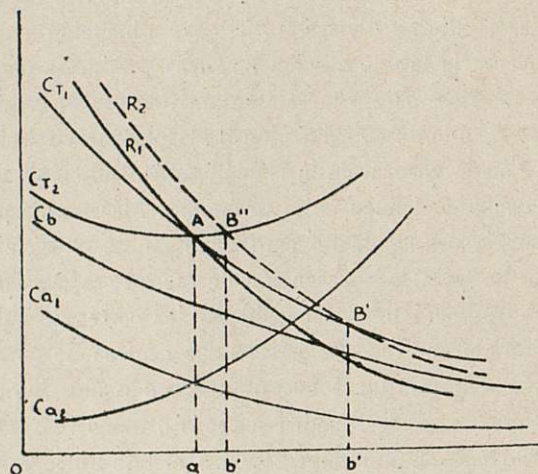


Fig. 11

comunidad en conjunto estas últimas no son tan valiosas como la primera, justo es que las tarifas presenten una discriminación en favor de los consumos bajos. Se podría argüir que estos resultados son completamente opuestos a los que resultan de aplicar el principio del precio de coste a cada abonado en particular y, por tanto, absolutamente inaceptable para una empresa privada; en todo caso, constituiría argumento adicional en favor de la empresa pública, pero creemos que la subsistencia de la empresa privada en un servicio público no se halla supeditada a la obtención de beneficios en «todos» los suministros que efectúa, sino tan sólo en el «conjunto» de todos ellos.

### III. LAS CIRCUNSTANCIAS DE NUESTRO CASO

#### 7. CONSIDERACIÓN ESPECIAL DE LA INFLACIÓN MONETARIA.

I. El fenómeno de la inflación monetaria, es decir, el aumento en la cantidad de numerario no acompañado de otro equivalente en la riqueza real, es uno de los más complejos entre los que han influido para modificar la estructura económica de nuestro país. Para ha-



cer un juicio crítico de la política económica que le ha dado origen, sería precisa la posesión de una escala oficial de valoración de los distintos fines propuestos y el pleno conocimiento de las posibles alternativas que se ofrecían y los medios de que se disponía; para llevarlas a feliz término, sin embargo, creemos existen razones para hacer especial referencia a ella en esta investigación que venimos haciendo respecto a los supuestos económicos de una política eléctrica.

Por lo que afecta a la empresa eléctrica, vamos a ver que si ésta trabaja en óptimas condiciones, es decir, en un régimen de tarifas calculadas adecuadamente para que se halle en el caso teórico del monopolio discriminado; una inflación ligera —que supondremos se efectúa instantáneamente para eliminar la tendencia secular al aumento en el consumo de energía— puede dar lugar a modificaciones en su economía interna que la sitúen en una posición próxima al régimen de funcionamiento en competencia perfecta, lo que, en definitiva, redundará en favor de la justicia social.

En efecto, toda inflación se traduce en aumento de precios, pero, como los precios de la energía no pueden variar a voluntad de las empresas, por hallarse sujetos a una intervención estatal, las cosas ocurrirán hasta cierto punto —veremos más adelante el porqué de esta limitación— como si nos halláramos ante una baja de tarifas, manteniéndose constantes los demás precios y dando lugar a un aumento en los consumos (1). Por tanto, mientras la inflación se mantenga dentro de una zona que produzca reducción relativa de tarifas reales desde  $f'E'$  y  $f''E''$  hasta  $K'J'$  y  $K''J''$  (figura 4), sólo se habrá disminuido el grado de monopolio de la empresa, una de las causas de desigualdad social.

Antes de seguir adelante, sin embargo, conviene estudiar el aumento de consumo desde otro punto de vista que, de paso, nos aclarará la limitación establecida. Sean 1, 2, 3, ... (fig. 12) curvas de indiferencia de una comunidad entre un bien concreto cualquiera, que llamaremos A, y el dinero que le sirve de medio para adquirir todos los demás bienes y servicios; es decir, admitimos que la comunidad halla el mismo bienestar con la posesión simultánea de las cantida-

des de ambos productos que corresponden a los valores de las coordenadas de los distintos puntos de cada curva. Sabemos, por las propiedades de las curvas de indiferencia, que la cantidad de A que se adquirirá

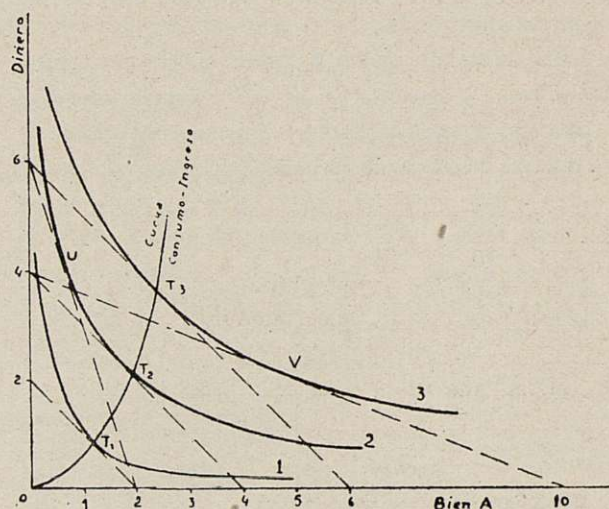


Fig. 12

con otra determinada de dinero total, p. ej., 6, y un precio determinado de A, p. ej., la unidad monetaria por cada unidad del bien, viene dada por el punto  $T_3$  de tangencia de la recta que une el punto 6 de la escala de ordenadas con el  $\frac{6}{1}$  de la de abscisas, con

una curva de indiferencia, en nuestro caso, la 3 (1). Si la cantidad total de dinero permaneciera invariable y el precio de una unidad de A fuese, por ejemplo, de tres unidades monetarias, el punto de tangencia U de la recta que une el mismo punto 6 del eje vertical con el  $\frac{6}{3} = 2$  del horizontal, con la curva 2 en este

caso nos daría la cantidad de A correspondiente a tales ingresos y precio. Si suponemos que el precio de A permanece constante pero varían los ingresos de la comunidad, los puntos de tangencia  $T_3$ ,  $T_2$ ,  $T_1$  de las rectas paralelas 6-6, 4-4, 2-2, con las curvas 3, 2 y 1, respectivamente, nos darán una curva de consumo-ingresos, en la que el primero corresponde a las abscisas y los segundos vienen dados por la intersección de las tangentes a las curvas de indiferencia con el eje

(1) Sobre esa relación tan olvidada entre precios y consumos y en especial sobre curvas de demanda de energía eléctrica. Véase BOLTON, *Curvas y Tarifas en el suministro de electricidad*, 1944.

(1) Para más detalles sobre las curvas de indiferencia. Véase BOULDIN, *Análisis Económico*, pág. 644 y siguientes, aunque el tratamiento no es idéntico.



de ordenadas, que, a menos de que el bien A sea uno de los que en economía son llamados inferiores —es decir, sucedáneos de otros más caros, y la electricidad no se encuentra en este caso—, tendrá abscisas mayores a medida que las paralelas se vayan alejando del origen de coordenadas.

Análogamente, si desde el punto 4 del eje vertical trazamos una tangente a la curva 3 y aquélla nos corta, p. ej., al eje de abscisas en el punto 10, el punto V nos dará el consumo de A para un ingreso de 4 y un

precio de  $\frac{4}{10} = 0,4$ ; y se observa que el punto V se hallará más alto o más bajo, pero siempre más a la derecha que el  $T_2$  correspondiente a ingresos y precios de 4 y 1, respectivamente. En definitiva, el consumo de A crece si permanece invariable el precio, aumentan los ingresos, y crece también al permanecer constantes los ingresos y bajar el precio; como las proporciones inversas son igualmente ciertas y la inflación puede repercutir ampliamente en el ingreso nacional, existe la posibilidad de que una reducción en los ingresos totales sea lo bastante fuerte para contrarrestar la tendencia al aumento de consumo originada por una baja en el precio, que es la limitación a que hicimos antes referencia. Sin embargo, como las cifras expuestas en § 0 indican que no nos hallamos en este caso, dejaremos de referirnos a él en lo sucesivo (1).

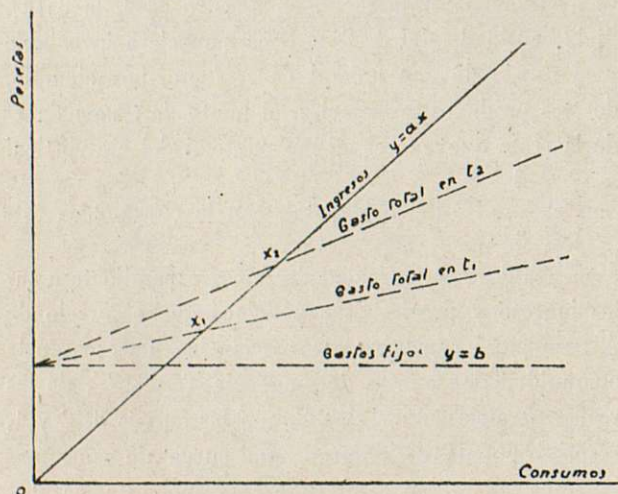


Fig. 13

(1) En un análisis riguroso el consumo de un bien varía, no sólo con las variaciones totales de la venta, sino en su distribución entre los diversos grupos sociales.

II. Como la inflación lleva aparejada aumento en la demanda de energía, estudiaremos su influencia sobre la estabilidad económica de la empresa eléctrica. Si admitimos una tarifa media constante e igual a  $a$ , la suma de ingresos será una recta  $y_1 = ax$  (fig. 13) que pasa por el origen de coordenadas, mientras que los gastos se descomponen en dos partes: unos, fijos, cuya representación será la recta  $y = b$ , y otros, variables con la producción,  $y = zx$ , que supondremos proporcionales a la misma, y cuya suma con los fijos nos dará el gasto total  $y_2 = zx + b$ . Para que la explotación sea rentable será preciso que  $y_1 > y_2$ , es decir, que  $ax > zx + b$ , de donde resulta que el consu-

mo  $x$  habrá de ser superior a  $\frac{b}{a-z}$ , esto es, que

el punto  $x = \frac{b}{a-z}$  señala el límite inferior de explotabilidad de la empresa, que aun variando con  $a$ ,  $b$  y  $z$  al alterarse el nivel de precios describe siempre una hipérbola de asíntotas paralelas a los ejes. En la

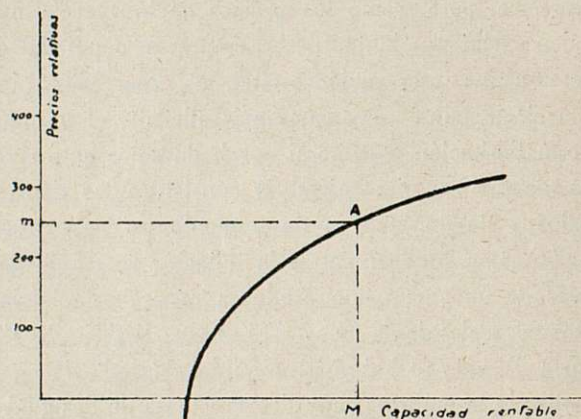


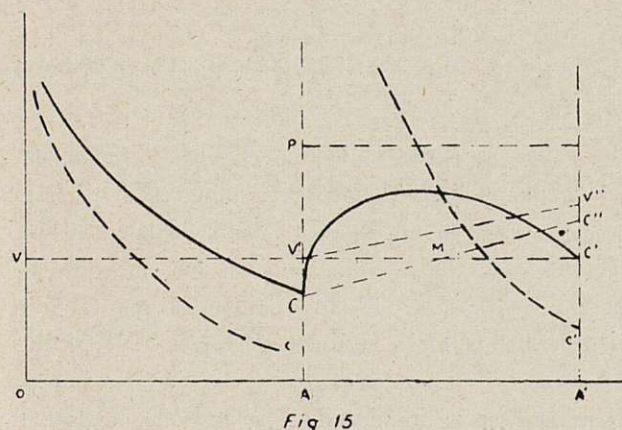
Fig. 14

figura 14 se ha representado esta curva en un sistema coordenado cuyo eje de ordenadas señale el índice de variación de precios y el de abscisas los valores mínimos de  $x$ ; como la capacidad de producción de una central es siempre limitada, la paralela al eje de las  $y$  y trazada por  $M$ , determina el punto A de la curva que nos da el  $m$  de máximo aumento de precios que la empresa puede soportar.

Como la proporción de gastos variables es mucho más elevada en las centrales térmicas que en las hidráulicas, el problema de su rentabilidad se presenta



Podría argüirse que la circunstancia de que una empresa eléctrica gane o pierda dinero es materia de la misma, que interesa poco a la comunidad, por afectar a la distribución de la riqueza, pero no a su producción; aun así el problema se presentará al agotarse la capacidad de las centrales existentes y resultar indispensable proceder a la construcción de otras nuevas. En la figura 8 estudiamos las condiciones bajo las cuales convenía a una empresa, en la hipótesis de que los costos de los factores permanezcan constantes, efectuar una nueva construcción, y hallamos que has-



menos, hasta que la línea  $CC''$  ( $A'C'' = \frac{AC + AP}{2}$ )

III. Tarde o temprano, pues, la inflación monetaria habrá de traducirse en una elevación de tarifas. Vamos a ver ahora que la necesidad de tal elevación proporciona nuevos argumentos a favor de la empresa unificada.

Vamos a ver, además, que es el único medio racional de llevar a cabo los aumentos de tarifas; para demostrarlo, emplearemos el argumento de la reducción al absurdo. En efecto, una elevación de tarifas



puede llevarse a cabo por uno de estos tres procedimientos: mediante una elevación uniforme de todas ellas, mediante una elevación proporcional al volumen de nuevas construcciones de cada empresa o mediante la igualación de las tarifas de todas las empresas. Pero:

a) La elevación uniforme de las tarifas de las diferentes empresas ni es justa, por no hallarse en relación con los mayores gastos originados por las nuevas construcciones de cada una de ellas —que es la causa justificativa del aumento—, ni conveniente, ya que ello perturbaría las diferencias locacionales para una misma aplicación y constituiría una medida discriminatoria a favor de determinadas regiones; es decir, determinaría una política diferencial que no tendría por base la superior conveniencia del país, sino circunstancias accidentales de orden muy distinto.

b) Si la elevación es proporcional al volumen relativo de las nuevas construcciones, permanece en pie la última objeción del caso anterior, sobre todo si se tiene en cuenta que la discriminación obraría totalmente en contra del desarrollo industrial de las regiones atrasadas, en las que un mismo volumen absoluto de obra representaría mayor valor relativo de la misma y mayor aumento en las tarifas. Además, la necesidad de fijar una cifra particular de aumento para cada empresa podría dar lugar a enojosas discusiones.

c) La igualación de tarifas de todas las empresas representa una medida neutra respecto a la localización —lo cual puede constituir una ventaja respecto a los demás sistemas examinados—, pero impide la utilización de arma tan poderosa como la discriminación de tarifas para la política económica que el Estado se proponga conseguir. El mayor inconveniente, sin embargo, es de orden moral, ya que, aun en el caso de establecerse subdivisiones según las características de la zona consumidora —mediante, por ejemplo, un recargo o una rebaja para las zonas rurales—, en todas ellas existen comarcas cuyo suministro resulta más lucrativo que el de las restantes, y tal medida favorecería la situación económica de aquellas empresas que, anteponiendo su interés propio al de la zona que han de servir —ya que se trata de un servicio público—, limitaron sus instalaciones a las regiones cuyo suministro era más rentable.

Ciertamente, para paliar los inconvenientes derivados de una falta de ecuanimidad en la aprobación de los recargos, se ha propuesto la creación de una caja de compensación encargada de distribuir los aumentos de recaudación entre las empresas con arreglo a determinados módulos; ello podría resolver el problema económico de las empresas sin necesidad de proceder a su unificación, pero la trascendencia que para las mismas significaría una interpretación favorable de los referidos módulos haría orientar toda su política de cara a la citada caja, desplazando a segundo término su interés por prestar buen servicio. Quizás no estaría demás hacer constar, aunque sólo sea para contrarrestar la tendencia del ingeniero a confundir los intereses del empresario que lo remunera con los de la comunidad a que pertenece, que, al fin y al cabo, es el público el que paga la energía consumida, lo que le da derecho a que sus intereses sean tenidos en cuenta.

## 8. EL PROBLEMA ESTRUCTURAL DE LA ECONOMÍA ESPAÑOLA.

I. Aunque parece lógico que el supuesto fundamental de una política económica radique en el perfecto conocimiento, en un momento dado, de la estructura del país a que ha de aplicarse y en una clara idea de la que se considere deseable para el mismo con objeto de atemperar las medidas a adoptar a los medios existentes y los fines perseguidos, lo cierto es que en el nuestro no se ha llegado a acuerdos concretos, ni aun en aquellas cuestiones que deberían considerarse como básicas. Y como es evidente que una política eléctrica deberá tender a obtener el máximo rendimiento de la energía disponible, creemos conveniente exponer algunas consideraciones de carácter general que quizás puedan contribuir a aclarar el problema.

Un compañero nuestro, Antonio Robert, ha dedicado una parte considerable de sus actividades a divulgar la necesidad de proceder a la inmediata industrialización en España. Su argumento básico es el de que la renta por individuo se halla en una relación definida con la estructura porcentual de la población activa; relación que supone de la siguiente forma (1):

(1) A. ROBERT, *El mañana económico de España*, pág. 139.



Renta en U. I. (1) por persona activa	Estructura porcentual de la población activa		
	Agraria	Industrial	Servicios
300	52,5	23,0	24,5
400	49,1	23,7	27,2
500	45,7	24,4	29,9
600	42,3	25,2	32,5
700	38,8	25,9	36,3
800	35,4	26,6	38,0
900	32,0	27,3	40,7
1.000	29,0	28	43

Por tanto, como, según los datos de 1940, la estructura de la población activa de España

Población activa en 1940	Unidades	Porcentajes
Agraria.....	4.780.952	51,9
Industrial.....	2.211.957	24,0
Servicios.....	2.215.758	24,1
TOTAL.....	9.208.667	100

Y la renta en U. I. por persona activa del orden de 300 U. I. con desplazamiento del sector agrario hacia el industrial o de servicios determinaría automáticamente un incremento de la riqueza nacional. De ahí, la necesidad de proceder a inmediata industrialización.

Impecable a primera vista el razonamiento expuesto, padece, a mi juicio, de un defecto esencial: el de considerar a la estructura porcentual de la población activa como a la causa, y, a la renta, como al efecto, sin comprender que puede haber razones que obliguen a admitir la hipótesis contraria, y aun la tercera de que ambos hechos sean efecto simultáneo de causas más profundas: la cultura técnica, por ejemplo. Por tanto, quizás no están demás algunos razonamientos que, de otro modo, podrían parecer triviales.

Admite Robert que, cuando la técnica de la producción es elemental, y, por tanto, mínima, la productividad, la casi totalidad de las energías laborales, están dedicadas a la agricultura. Pero ahora sería preciso establecer una distinción:

a) Que la producción agrícola del país presente un exceso sobre la cantidad que se considere precisa para

(1) U. I., unidad monetaria internacional igual al valor medio del dólar en el decenio 1925-1934.

su subsistencia. En este caso el país exportará productos agrícolas e importará productos industriales; el traslado de población agrícola a actividades industriales será conveniente —prescindiendo de consideraciones de seguridad exterior— cuando el producto industrial de los obreros y capitales agrícolas desplazados sea superior a la cantidad de los mismos que podría adquirirse mediante intercambio con los excedentes agrícolas anteriormente obtenidos.

b) Que no presente el exceso mencionado en el caso anterior. Un desplazamiento de productores agrícolas hacia actividades industriales será conveniente, cuando la exportación de los productos obtenidos permita conseguir por intercambio una cantidad de productos agrícolas superior a aquella a la que se ha debido renunciar con el desplazamiento de los productores hacia trabajos industriales.

Pero, salvo casos excepcionales de abundancia de ciertas clases de primeras materias, será imposible para un país de técnica poco desarrollada exportar cantidades considerables de productos industriales en competencia con otros de técnica muy avanzada; por tanto, la industrialización de un país agrario requiere, como condición necesaria, que la producción agrícola presente un excedente. En el caso de que no lo presente, el primer paso será conseguir su obtención, y, como ello implica aumentar la renta, la elevación subsiguiente del porcentaje industrial significará el efecto, y no la causa, de la elevación de la renta.

II. Posiblemente, la causa fundamental de mi falta de acuerdo con Robert estriba en la base de la clasificación adoptada para las distintas actividades. En un país nuevo, como Estados Unidos, por ejemplo, la separación entre agricultura, industria y servicios puede resultar muy adecuada, ya que, en la inmensa mayoría de los casos, las tres clases de actividades se desarrollarán según técnica muy adelantada. Pero en los países viejos, como España, en los que existen todavía amplias zonas donde el medio de vida no ha sufrido casi variación desde hace siglos, la base de la dicotomía debería ser otra, por ej., la de *producción rutinaria* y *producción racionalizada*, comprendiendo ambas clases de actividades de los tres grupos generalmente admitidos. Existen más semejanzas entre los métodos de cultivo de algunas regiones españolas con la confección casera de tejidos en las mismas y las prácticas de curanderismo, que entre di-



chos métodos de cultivo y los de las huertas levantinas; por ello mismo, la existencia de 5.018 obreros dedicados a la industria del calzado en la provincia de Badajoz, según el censo de 1940 —pongamos como ejemplo—, no significa, ni mucho menos, que su importancia alcance la tercera parte de la que tiene en la provincia de Alicante, con 14.448. Admitido que la base del aumento de riqueza en un país agrario de producción deficiente —y, por tanto, la base de su industrialización— consiste en la elevación de su productividad agrícola, el fin primordial de la política eléctrica española habrá de ser el de facilitar aquella elevación. Recientemente se ha hablado mucho —y quizás fantaseado bastante— sobre electrificación rural; de todo lo escrito persisten tres orientaciones que convendría atender cuidadosamente:

a) Suministro de energía para alumbrado —y quizás algún uso doméstico— al mayor número posible de viviendas rurales, ya que la misma facilita los medios para unas condiciones mínimas de comodidad indispensables para que los espíritus activos que pueda haber entre sus habitantes no sientan deseos de emigrar a zonas en que la vida sea más cómoda.

b) Implantación de nuevos regadíos en las zonas en que resulte económicamente posible. Dijimos en un lugar anterior (§ 5) que el regadío constituye una utilización del agua en competencia con la producción de energía eléctrica; ahora llevaremos nuestra afirmación más lejos: en algunas zonas de clima y calidad de tierras particularmente adecuadas —y estamos pensando, sobre todo, en amplias comarcas andaluzas— podrá resultar económicamente conveniente el consumo de grandes cantidades de energía —transportada, si es preciso, desde otras regiones— en la elevación de aguas para conseguir el aprovechamiento integral para riegos de buena parte de la que actualmente se pierde en el mar.

c) Intensificación de la fabricación de abonos: desde el punto de vista eléctrico tiene especial interés la de abonos nitrogenados; pues no hay obstáculos en lo que afecta a las primeras materias, España debería bastarse sobradamente a sí misma aun haciendo uso generoso de ellas. Aunque ha hecho bastante en este camino, queda todavía amplio camino por recorrer.

En cambio, estimo se ha abusado demasiado de la propaganda a favor de un mayor uso de maquina-

ria agrícola; mientras la que tiene por objeto mejorar los cultivos debe recomendarse sin duda alguna como factor poderoso para conseguir un aumento de productividad, no cabe olvidar que la mayor parte de ella tiene como fin principal la eliminación de mano de obra, aun a riesgo de provocar reducción en los rendimientos por hectárea, lo que fatalmente ha de conducir a paro obrero. Porque, al no mejorar la capacidad adquisitiva del campesino, faltarán mercados donde colocar los productos industriales que, con los obreros desplazados, podrían teóricamente haberse fabricado.

Pero, ¿quiere ello significar que la industrialización es sólo un hecho derivado y, por tanto, que su contribución al aumento de la renta nacional deba quedar relegada a un papel secundario? Nuestra contestación negativa a estas preguntas podrá parecer paradójica a un observador superficial que podrá interpretarla como contradictoria con lo expuesto, pero creemos existen razones poderosas para defenderla como intentamos hacer ver a continuación.

III. La industrialización es hecho derivado de la productividad agrícola, no sólo porque, al ser las necesidades alimenticias las de orden más fundamental el desplazamiento hacia la industria sólo será posible cuando los obreros tengan asegurados sus medios de subsistencia con el exceso de producción de los agricultores, sino también —lo cual no es más que el mismo argumento desde otro punto de vista— porque la industria sólo podrá colocar sus productos en el campo cuando éste disponga de un excedente para el intercambio.

Pero el hecho de que el papel de la industria en el aumento de la renta sea de orden derivado, no significa, forzosamente, que sea meramente pasivo; al contrario, ejerce —en las debidas condiciones— un interesante papel de acelerador o catalizador. Veamos cómo:

Dijimos antes que, tanto la producción rutinaria como la industrial, pueden darse, así en el campo de las actividades agrícolas como en el de las industriales; sin embargo, el hecho mismo de que en las zonas rutinarias el grado de industrialización sea muy reducido, nos indica ya que el lugar adecuado de esa clase de producción se halla en la agricultura. En efecto, cuando los tres factores de producción —tierra, trabajo y capital— corresponden a una misma



mano, un escaso rendimiento debido a un sistema antieconómico de producción puede subsistir con mucha mayor facilidad que cuando el trabajo es facilitado por personal asalariado al que ha de retribuirse con una cantidad prefijada con independencia del resultado de la explotación; ello explica que muchos pequeños propietarios sigan cultivando sus tierras con métodos primitivos a pesar de que el beneficio que obtienen de las mismas sea inferior al que conseguirían como asalariados en la industria. La ley de los rendimientos decrecientes en la agricultura contribuye también poderosamente. Mientras en la industria la lucha entre dos empresas termina a favor de la que consiga un precio de coste más bajo, por hallarse en condiciones de ampliar su producción hasta absorber totalmente el mercado de la otra, en la agricultura el aumento de producción a partir de cierto límite sólo puede conseguirse a costa de un mayor precio que impide realizar aquella absorción.

El productor racional, en cambio, puede darse tanto en la agricultura como en la industria, pues se caracteriza por el hecho de saber sacar el máximo rendimiento a las ocasiones que se le presentan, y ello tan posible es en una clase de actividades como en la otra. Pero, como el productor rutinario no lo es por amor a los bajos rendimientos, sino por su desconocimiento de los más elevados que pueden obtenerse con métodos más racionales, el mejor conocimiento del valor de las cosas que en la industria se posee determina que, al industrializarse una región, aumente también el nivel de su agricultura —por ejemplo, el valle del Llobregat, junto a Barcelona—, aunque, en algún caso, el camino haya sido el contrario: por ejemplo, la industriosa región alicantina flanqueada por los antiquísimos vergeles de Valencia y de Murcia. Si a los métodos racionales de producción les damos ahora el nombre de cultura técnica, llegaremos a la conclusión de que el problema del campo español es problema de cultura técnica.

Toda medida que, directa o indirectamente, consiga la elevación del nivel técnico del agro español, elevará al mismo tiempo el nivel de vida y el grado de industrialización de la Nación. Indudablemente, tal resultado puede ser obtenido mediante iniciativas de orden muy distinto; la intensificación de la enseñanza agrícola ha de dar seguramente magníficos resultados, el traslado de agricultores de zonas ade-

lantadas a otras más rutinarias está especialmente indicado para los nuevos regadíos que se vayan creando. Por nuestra parte, desde hace algún tiempo estamos tan convencidos de las ventajas que reportaría una más racional distribución locacional de la industria dentro del ámbito nacional, dando ocasión a los agricultores de las zonas rutinarias para convencerse «de visu» de los beneficios que pueden obtenerse mediante la aplicación de la inteligencia al aprovechamiento de los recursos naturales que, como dato previo necesario para la misma, presentamos en las *II Jornadas de Ingeniería Industrial* celebradas el año último un detenido estudio sobre los factores que habían determinado la actualmente existente, y que terminaba con los siguientes párrafos:

«No debe olvidarse el carácter estimulante que la industria ejerce sobre el perfeccionamiento de los métodos de cultivo de la zona en que se halle situada, sobre todo, cuando aquéllos están retrasados por la carencia de espíritu de iniciativa; a igualdad de las demás circunstancias parece, pues, aconsejable favorecer la implantación de nuevas industrias en las zonas que se encuentren en tales condiciones.»

«Dado el diverso grado de desarrollo industrial alcanzado por los distintos focos litorales parece preferible procurar la industrialización de aquellos cuyo desarrollo se encuentra en una fase más atrasada, Andalucía y Galicia. Pero, como las causas de esa situación son distintas en las dos regiones, distintos parece deberían ser los métodos empleados para conseguirlo: En Andalucía, combatiendo el latifundio mediante parcelaciones de los terrenos que reúnan condiciones, sobre todo, en zonas donde sea posible crear nuevos regadíos, e intensificando los cultivos industriales susceptibles de dar lugar a una floreciente industria derivada; en Galicia, en cambio, mediante una política de protección de nuevas instalaciones para procurar la descongestión de sus zonas rurales excesivamente pobladas y mejorar la superficie media de las unidades de explotación agrícola. Sin olvidar que las posibilidades de producción de energía eléctrica, limitadas en la primera y abundantísimas en la segunda, aconsejan reservar para Andalucía la industria ligera y destinar Galicia para las grandes plantas consumidoras de energía.»

«Por ser muy diversa la cantidad de personal especializado que requieren las diversas clases de in-



«industria, y por ser la técnica industrial consecuencia —que no causa— de la industrialización, todo aconseja reservar los actuales focos para aquellas industrias que requieran personal obrero particularmente hábil.»

«En definitiva: establecer una discriminación en los criterios oficiales para la autorización de nuevas industrias que tuviera como base preferente las muy diversas necesidades económicas de las distintas regiones españolas.»

Resta sólo añadir que la necesidad de obtener autorización oficial para la implantación de una nueva industria hace relativamente fácil el uso del procedimiento mediante adecuados criterios de diferenciación locacional que, además, supondrían coacción mucho menor de lo que podría suponerse, ya que, al ser el emplazamiento actual de las industrias producto de factores de muy distinto orden, entre los cuales juega papel muy importante el diverso espíritu de iniciativa de los naturales de las distintas regiones, aquellos criterios podrían significar la corrección de los de carácter extraeconómico y la más perfecta adecuación de la estructura económica del país a sus posibilidades, lo que habría de traducirse en elevación de los rendimientos y del nivel de vida.

IV. Para dejar bien claro el sentido de lo indicado, expondremos la aplicación de nuestro criterio a Galicia y, en particular, a la provincia de Lugo, cuyos intereses industriales nos está confiado defender, copiando una parte de la memoria elevada a la Superioridad a principios de año sobre el panorama industrial de la provincia (1):

«Como quiera que es indudable ventaja de la economía dirigida la de poder supeditar las finalidades estrictamente económicas de una actuación gubernamental a resultados de orden sociológico más fundamental, la palabra decisiva para el porvenir de la industrialización de la provincia corresponde pronunciarla a organismos extraños a ella, y depende de que por la Superioridad se estime o no como conveniente la redacción de un plan de discriminación locacional de la industria que tenga en cuenta las muy distintas circunstancias y necesidades de las diversas provincias españolas. El problema que se plantea es el de determinar las medidas que se estimen más adecuadas para

transformar la actual distribución especial de la industria en la Nación en aquella otra que se considere más conveniente, bien mediante la adopción de criterios diferenciales para la autorización de nuevas industrias según las condiciones de las zonas, bien —si ello se estimara insuficiente— mediante el traslado forzoso de determinadas instalaciones de un emplazamiento a otro más adecuado.

«Estas observaciones nos han sido sugeridas principalmente en vista de la abundancia —superabundancia, quizá— de energía eléctrica de que va a disponer la región gallega dentro de período de tiempo relativamente breve, si se llevan a buen término los saltos cuya construcción ha sido ya iniciada y que va a cuadruplicar, por lo menos, las disponibilidades de la misma, lo que plantea ya de por sí el dilema de si se habrá de transportar la energía a zonas ya industrializadas y en las que, por la tradición de que disponen en este sentido, es más probable se intente situar las nuevas industrias, si se deja su establecimiento a la libre iniciativa privada, o si se habrá de favorecer su emplazamiento «in situ» para evitar los gastos y las pérdidas que origine su transporte. Con tanta mayor razón cuanto que el problema de la industrialización gallega existiría con independencia de su favorable situación eléctrica y que puede resumirse en la siguiente pregunta: ¿Es preferible aumentar el volumen de las urbes y las grandes zonas industriales mediante la «importación» de obreros de otras provincias, con el consiguiente desarraigo de los mismos del ambiente familiar y social a que se hallaban habituados y su transformación en anónimas masas proletarias, o conviene mejor industrializar las zonas rurales con exceso de población como medio de crear nuevos mercados para sus productos naturales y de aumentar el nivel cultural de las mismas que se traduciría en perfeccionamiento de los medios de cultivo y aumento de la producción?»

De aceptarse este criterio, creemos que la industrialización de la provincia de Lugo debería orientarse en las dos siguientes direcciones:

«1. Industrias derivadas de la carne.—La excepcional riqueza ganadera, que convierte a la provincia en principal fuente de suministro de ganado vacuno para la Nación, junto con la existencia en su capital de una industria del ramo de bastante importancia, aconsejan emprender en ella la instalación de un matadero in-

(1) Consejo Superior de Industria. Anexo a la Memoria del año 1947, pág. 162 y 163.



dustrial con capacidad suficiente para absorber el total de ganado dedicado al consumo de la zona interior de la Nación, y de las factorías industriales necesarias para el aprovechamiento de los subproductos.

»En este sentido están realizando las autoridades provinciales bien orientadas gestiones cerca de la Comisaría General de Abastecimientos y del Instituto Nacional de Industria para coordinar su establecimiento con el plan general del frío que se está elaborando.»

«Para darse cuenta del interés nacional del asunto, basta considerar que de la provincia salen anualmente muy cerca de las 100.000 cabezas de ganado vacuno, cuyo transporte en vivo requiere cerca de 4.000 vagones, y que si se calcula una pérdida de 10 Kgs. de peso por cada res transportada viva, representa una pérdida de 1.000.000 de Kgs. de carne. Únase a ello el que las instalaciones necesarias para el aprovechamiento de los subproductos —pieles, tripas, hueso, etcétera— podría dar un considerable impulso a la languida vida industrial de la provincia.

»2. Siderurgia.—En Memorias de años anteriores hemos insistido en llamar la atención hacia la existencia en la provincia de yacimientos de hierro de suma riqueza. Hoy podemos añadir que se están ya realizando esfuerzos para conseguir su aprovechamiento, y que se investigan cuidadosamente por la iniciativa privada las posibilidades económicas de los yacimientos de magnetita de Caurel, en la parte S. E. de la provincia. Se han remitido a Suecia, para la realización de ensayos industriales, muestras de mineral y de antracita de la próxima zona de Ponferrada; de tener buen éxito, se proyecta establecer una gran planta siderúrgica en Quiroga, a orillas del río Sil, que representaría un notable punto de apoyo para la industrialización de la provincia.

»Podría parecer raro que, después de haber hecho destacar el exceso de producción hidroeléctrica de la región, como base de la industrialización gallega, omitamos propugnar el establecimiento de grandes instalaciones de este tipo, principalmente de obtención de abonos nitrogenados que tan indispensables son para las cansadas tierras laborales de la provincia. Sin negar su posibilidad, creemos que su ubicación resultaría más adecuada en alguno de los grandes puertos gallegos con objeto de abastecer, además, por vía marítima a la zona andaluza, cuyas escasas posibilidades

eléctricas no aconsejan la instalación en ellas de plantas de este tipo.»

#### IV. CONCLUSIONES

##### 9. LOS SUPUESTOS ECONÓMICOS DE UNA POLÍTICA ELÉCTRICA.

Al iniciar este estudio se hizo constar la preponderante importancia que en estos últimos tiempos se ha concedido a la acción ante el pensamiento. Ejemplo típico de este hecho puede observarse en el contraste existente entre el afán que se nota para encontrar soluciones radicales a los problemas económicos planteados y el poco interés que se pone en examinarlos de un modo objetivo y desapasionado, es decir, aplicando la inteligencia en lugar de la intuición. A tal extremo llega dicho afán que, al repasar las páginas que anteceden, no he podido menos que sentirme azorado, tanto por mi poca habilidad para llegar a conclusiones concretas y definitivas para hallar remedio a los males que aquejan a la economía eléctrica de nuestro país, como por la escasa o nula novedad que lo expuesto significa ante la doctrina sostenida por los escritores de mayor autoridad en materia económica.

Pero, si grande ha sido mi confusión, ésta ha sido superada por mi sorpresa, porque, si nada de lo dicho constituye ninguna novedad, se halla, en cambio, en profundo desacuerdo, no sólo con algunas normas de conducta económica actualmente en vigor —lo cual, en último extremo, podría ser atribuido a necesidades de carácter extraeconómico—, sino con el rumbo que siguen las escasas investigaciones que en esta materia se realizan. Así, por ejemplo, y a pesar del constante esfuerzo realizado a lo largo de todo el estudio para no separarme del tono doctrinal con objeto de no alargarlo excesivamente, he necesitado de toda mi voluntad para no detenerme en el examen de dos problemas particulares, a mi juicio, de sumo interés, que han sido objeto de poca atención hasta tiempos muy recientes, y aún ésta de forma muy parcial.

1. La desvalorización relativa del precio de la energía considera como una prima para la construcción de motores y máquinas de mal rendimiento.

2. Medidas para obtener una discriminación estacional de consumos en armonía con las variaciones es-



tacionales de producción de energía debidas al régimen hidráulico, tan variable, de los ríos españoles.

El primer problema se tiene en cuenta en la actualidad mediante la aplicación de recargos por consumo de energía reactiva, y el segundo por la imposición de medidas coactivas de restricción en las épocas de producción insuficiente, pero nadie negará que la primera solución aparece aún como muy tímida y la segunda como muy forzada para la perfecta resolución de los problemas que han impuesto su establecimiento.

Si, de acuerdo con la costumbre admitida, hemos de proceder a resumir en pocas líneas las conclusiones más interesantes que se deducen de las consideraciones expuestas en las páginas anteriores, la afirmación más absoluta que podríamos hacer es la necesidad de tener en cuenta en cualquier planificación económica que se redacte en lo sucesivo la compleja diversidad y las insospechadas interacciones de las situaciones que pueden presentarse en una economía dirigida, lo que exige detenido estudio de las medidas que se adopten, y extremada cautela en su aplicación teniendo constantemente a la vista los resultados obtenidos en la práctica.

Sin embargo, como tal afirmación probablemente será admitida unánimemente, y la luz de la verdad resulta más bien del contraste de pareceres que hace salir a la superficie matices de los problemas que antes no habían sido objeto de examen, me permito someter a la inteligente consideración de los señores Congresistas cinco conclusiones de carácter más definido, con la esperanza de que las observaciones que se

dignen hacer sobre las mismas contribuirán a aclarar aspectos quizás poco conocidos de la compleja cuestión de la política eléctrica más conveniente para nuestra nación y tendrán como resultado conseguir que el considerable aumento logrado en su potencialidad eléctrica quede debidamente reflejado en la paralela mejora de su nivel de vida. Estas conclusiones son:

1.<sup>a</sup> El buen éxito de una política eléctrica no debería medirse tanto por la cantidad de energía producida y consumida como por el aumento de riqueza —material y moral— conseguida mediante la utilización de aquella energía.

2.<sup>a</sup> La propia naturaleza de la energía eléctrica, como medio y no como fin, exige como requisito indispensable para el buen éxito de una política eléctrica la previa determinación de los fines para los que aquella se ha de utilizar; es decir, el establecimiento de la política económica total de la Nación.

3.<sup>a</sup> Una discriminación específica y locacional de las tarifas puede constituir un arma poderosa en la dirección de la economía nacional en el sentido que se estime más conveniente.

4.<sup>a</sup> Las tarifas decrecientes son totalmente inadecuadas como base de facturación en las épocas de escasez de energía; y

5.<sup>a</sup> La constitución de una Empresa única de ámbito nacional, con participación mixta del Estado y del capital privado, facilitaría el buen éxito de la política eléctrica adoptada.

Lugo, marzo de 1950.

---

---

*Sin observaciones a este trabajo, y con la venia de la Presidencia, se pasa a leer el siguiente trabajo, núm. 143, de D. Justo Pastor Rupérez:*



## N.º 143. - Necesidad de interpretar con ponderación los datos hidrológicos al justipreciar las posibilidades hidroeléctricas nacionales

Autor: D. JUSTO PASTOR RUPÉREZ  
Ingeniero Industrial

### INTRODUCCIÓN

En dos sentidos opuestos puede incrementarse el bienestar material humano: uno de ellos, mediante el aumento de bienes; el otro, disminuyendo las necesidades. Mas es innegable que se precisa un mínimo de riqueza para garantizar el bienestar, y la apreciación de dicho mínimo marcará la pauta sobre cuál, de los anteriores criterios, convendrá seguir en cada caso particular.

Por lo que se refiere a España, la revolución, que provocó el Alzamiento, puso de relieve cómo la proporción de riqueza nacional acumulada por los ricos era tan ínfima que, a pesar de las medidas socializantes de incautación integral, no pudo apreciarse mejora sensible en el bajo nivel medio de vida de nuestro pueblo. Claramente se llega, por lo tanto, a la conclusión de que, si España ha de aumentar su bienestar material, precisa elevar el nivel de vida incrementando sus bienes mediante un esfuerzo común de producción.

Para juzgar sobre nuestras limitaciones en bienes después de la guerra civil, basta citar tres índices característicos como son la producción de hulla, riqueza de que dependen casi todas las modalidades de la vida actual, la de energía eléctrica, y la de acero, y compararlos con los correspondientes, en dicha época, a los países comercialmente relacionados con nosotros.

Así, la dotación anual de hulla por habitante, índice de la *potencia fáustica* de un país, es al final de nuestra guerra, de 4 toneladas en Inglaterra, de 3,5 en los EE. UU., en Alemania de 2,5, de 1,5 en Francia y en España de 0,2; a un inglés corresponde, pues, la hulla de 20 españoles.

En cuanto a la energía eléctrica (nos referimos a la misma época), Noruega dispone de 3.000 kw.-h. por habitante y año, Suecia y Suiza de 1.300, Alemania de 700, de 430 Francia, Italia de 350 y España de 150 solamente; un noruego dispone, pues, de la energía eléctrica correspondiente a 20 compatriotas nuestros.



Y si pasamos a la producción de acero por habitante y año, es en la fecha indicada, de 480 Kgs. en Norteamérica, de 320 Kgs. en Alemania, en Inglaterra de 280 Kgs., de 200 Kgs. en Francia, de 52 Kgs. en Italia y únicamente de 24 Kgs. en España; un norteamericano produce el acero de 20 compatriotas nuestros. Y esta última limitación es doblemente dolorosa si se considera que en 1930 España producía por individuo el doble de la cifra anterior.

Si bien dichos índices no podían tomarse en sentido absoluto si se toma en cuenta la modalidad agrícola de nuestro país, eran suficientemente significativos para motivar el creciente plan e industrialización de España, con tanto acierto impulsado por nuestras Autoridades, plan en el que va incluida la electrificación, con el subsiguiente incremento de las necesidades de energía eléctrica, que al presente superan los 8.000 millones de kw.-h. anuales.

Consecuencia de cuanto antecede es la preocupación que existe por estimar las posibilidades hidroeléctricas nacionales, preocupación que si bien loable y necesaria ha dado lugar a estudios demasiado optimistas que han creado en la opinión pública la falsa idea de que nuestro país es privilegiado en riquezas, y entre ellas la energía hidroeléctrica tiene posibilidades insospechadas. Tan es así, que se admite corrientemente como incuestionable que nuestras disponibilidades hidroeléctricas tienen suficiente capacidad para garantizar un consumo anual por individuo de 1.000 kw.-h. con una población superior a los 40 millones de habitantes.

Aun cuando nos encontremos todavía alejados del instante en que queden agotadas las posibilidades hidroeléctricas de España, el crecimiento del consumo eléctrico, que desde 2.500 millones de kw.-h. en 1937, supera el año actual los 8.000 millones; las cifras más o menos aleatorias de crecimiento probable de aquél y las más reales de aumento de población registradas en los últimos años, aconsejan revisar con criterio de prudencia la veracidad de las estimaciones publicadas en los estudios referentes a dichas disponibilidades hidroeléctricas.

Sin criticar la garantía que puedan ofrecer los datos de aportaciones de nuestros ríos, sin tener en cuenta la posibilidad o imposibilidad de establecer embalses reguladores, sin calcular la dotación del combustible nacional que puede destinarse a producir energía tér-

mica de compensación en épocas deficitarias, se citan demasiado en los muchos estudios aparecidos, las *lluvias medias* y los *caudales medios*, sin tener en cuenta la desigual distribución de aquéllas y la gran irregularidad de los ríos españoles, relativamente a los de la Europa situada al Norte del paralelo 45°, pues se toma como base en la estimación de las posibilidades hidroeléctricas, regímenes hidráulicos ficticios tan carentes de realidad como son los llamados *años medios*.

El carácter torrencial de los ríos españoles y su gran irregularidad, cuyos coeficientes (relación de la aportación máxima anual a la mínima de la serie) superan a 7, contra 1,5 a 2 en los principales ríos del centro de Europa, hace inadecuada la utilización, sin grandes reservas, del *año medio*, para calcular las disponibilidades hidroeléctricas en cuestión.

Actualmente, los únicos sistemas eficaces de almacenamiento de la energía eléctrica son los embalses reguladores situados aguas arriba de los saltos aprovechables y las reservas de hulla apilada al pie de las centrales térmicas o reservada en las minas próximas a las mismas.

Las características geológicas de nuestro suelo, así como las necesidades agronómicas del país, limitan notablemente la creación de embalses de regulación hiperanual, los cuales, por otra parte, dada la gran irregularidad de nuestros ríos, habrían de tener capacidad excepcional, como más adelante se comprueba. Por otra parte, no puede España destinar proporción importante de su hulla a la producción de energía eléctrica, pues precisa de su empleo como primera materia para transformaciones industriales de positiva ventaja en su economía (el carburante nacional, por ejemplo) y, además, al no disponer en absoluto de petróleo, dedica un 9 por 100 de su carbón a la flota (mercante y de guerra), contra un 2 por 100 Alemania, un 4 por 1.000 Inglaterra y un 2 por 1.000 Estados Unidos.

De unos 16.000 millones de kw.-h. anuales en que se cifraba hacia 1920, la capacidad de producción hidroeléctrica nacional se ha pasado al presente a estimar, después de las pronunciadas sequías experimentadas, en especial los años 1921, 1938, 1945 y 1949, con los mismos ríos y análogos desniveles, en 38.000 millones de kw.-h. anuales las posibilidades hidroeléctricas nacionales. Y si bien la primera de las anteriores cifras



IBERDUERO. S. A.

CUENCA DEL DUERO

RIO DUERO

CUENCA VERTIENTE HASTA LA ESTACION: 41.800 Km<sup>2</sup>.

Estación D. 0.4 en

VILLACHICA

Cota del cero de la escala: 637,97 m.

EL NOTICIERO JUBAÑO 12733

Estación en servicio desde 19\_20\_.

Mod. E. P. 52

Mod. E. P. 52																		
Caudales medios mensuales (m. <sup>3</sup> seg. <sup>-1</sup> )	Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Módulo	Caudal máximo	Caudal mínimo	Aportación anual (10 <sup>6</sup> m. <sup>3</sup> )	
	1920	220,64	182,69	248,26	268,30	131,32	71,60	45,16	18,26	26,40	62,06	90,33	136,97	124,97	463,00	13,00	3.951,93	
	1921	132,09	98,96	79,26	51,63	128,87	203,03	38,00	22,90	30,73	43,16	41,97	61,93	77,49	474,00	15,00	2.443,82	
	1922	127,84	281,14	165,10	282,77	125,68	60,63	18,52	12,40	20,83	46,39	148,10	83,37	112,88	835,00	4,00	3.559,70	
	1923	137,41	193,82	291,48	227,33	127,97	45,43	26,02	14,28	20,08	25,28	92,58	248,23	120,49	492,45	10,00	3.799,92	
	1924	197,58	273,42	501,72	452,14	175,16	50,11	16,49	14,49	28,51	28,58	48,83	137,49	159,93	1479,82	12,40	5.057,33	
	1925	89,10	79,05	151,68	236,74	163,04	150,32	30,82	14,10	14,05	28,77	134,35	317,60	117,60	742,55	11,00	3.708,79	
	1926	267,24	633,55	280,43	367,42	234,04	114,07	45,63	23,35	25,68	38,47	307,03	301,07	211,51	1304,31	18,55	6.670,32	
	1927	217,35	233,16	421,74	258,31	164,87	86,31	56,53	28,08	34,82	61,49	146,67	455,23	180,50	1521,80	24,20	5.692,22	
	1928	344,54	226,81	342,40	362,34	382,56	221,28	68,80	41,29	44,00	68,42	106,32	95,61	191,93	805,00	33,70	6.069,19	
	1929	143,17	289,83	221,80	111,24	111,66	88,79	50,88	17,98	40,44	44,40	122,31	340,69	131,09	650,00	12,80	4.133,93	
	1930	283,89	352,28	403,11	358,86	387,68	358,23	149,52	59,82	49,72	73,27	71,62	170,67	225,71	1415,00	45,00	7.117,96	
	1931	241,52	167,18	439,39	235,17	129,52	57,17	41,81	35,71	31,67	50,00	164,33	101,16	141,21	1205,00	29,00	4.453,31	
	1932	107,87	69,14	96,29	110,00	141,93	96,64	78,26	53,90	47,07	70,06	113,33	395,16	115,74	821,00	41,00	3.659,99	
	1933	212,26	278,86	504,00	184,84	132,29	104,40	54,26	40,32	47,07	61,71	112,17	164,22	157,54	1259,00	35,00	4.968,26	
	1934	208,74	127,39	281,77	334,47	275,29	127,47	43,97	44,61	41,93	46,45	58,10	300,52	157,99	635,00	35,00	4.982,51	
	1935	137,71	226,68	333,06	110,53	158,93	184,60	59,52	53,87	44,83	52,77	77,97	341,93	148,37	1275,00	42,00	4.679,16	
	1936	809,22	895,90	529,10	588,57	503,68	256,07	177,22	81,58	55,03	72,35	91,73	88,58	343,81	1650,00	46,00	10.872,00	
	1937	210,81	469,00	508,52	324,23	159,42	105,53	50,42	15,90	26,43	73,26	185,93	441,84	212,85	1345,00	10,00	6.712,50	
	1938	287,32	158,36	126,29	59,60	59,03	22,50	9,62	6,68	24,70	34,10	55,43	223,29	88,87	715,00	5,00	2.802,55	
	1939	473,06	208,10	144,71	245,87	98,26	73,47	25,22	11,16	18,50	94,84	206,83	139,45	144,53	1605,00	6,00	4.557,85	
	1940	286,93	542,72	272,22	130,77	229,48	106,80	54,71	29,19	29,57	73,48	163,33	131,77	169,58	1090,00	17,00	5.362,41	
	1941	551,32	799,68	575,45	380,80	527,87	367,17	138,45	86,39	74,63	89,19	107,50	104,16	313,84	1624,67	67,00	9.897,29	
	1942	129,64	133,96	179,42	185,10	181,84	80,50	48,61	41,22	61,27	83,74	116,17	136,74	114,74	321,00	30,00	3.618,43	
	1943	308,71	213,07	157,81	172,30	154,68	47,20	42,00	32,35	49,20	80,55	117,30	164,32	127,94	616,00	28,00	4.034,79	
	1944	91,17	56,75	96,73	128,65	58,91	29,12	19,93	12,78	35,75	33,64	49,70	99,62	59,39	236,09	7,76	1.878,28	
	1945	98,85	195,96	84,24	54,16	22,68	13,95	13,48	12,55	12,53	15,84	47,52	137,66	58,29	336,62	6,01	1.838,25	
	1946	98,41	75,18	107,48	246,43	412,15	134,12	29,33	27,03	31,42	36,96	43,64	83,95	110,76	765,00	19,75	3.493,05	
	1947	98,29	471,43	716,08	380,90	190,09	97,14	48,21	39,12	69,86	67,42	62,63	85,34	192,05	1676,00	30,81	6.056,38	
	1948	445,20	397,57	159,85	123,54	164,35	84,07	32,85	36,75	32,27	41,32	46,91	67,33	135,27	1712,00	7,76	4.277,72	
	1949	67,47	51,13	51,11	52,98	41,06	36,36	18,56	7,74	30,62	53,69	59,70	74,16	45,33	137,24	4,90	1.429,57	
	19																	
	19																	
	19																	
	19																	
	19																	
	19																	
	19																	
	19																	
	19																	
	19																	
	19																	
	19																	
	19																	
	19																	
	19																	
	19																	
	19																	
	19																	
19																		
19																		
19																		
19																		
19																		
19																		
19																		
19																		
19																		
19																		
19																		
19																		
19																		
19																		
19																		
19																		
19																		
19																		







constituyen estimación por defecto, no debe admitirse la segunda sin previa revisión, haciendo para ello razonada crítica de las supuestas premisas y datos que han servido de base a la misma.

En primer lugar, las series de caudales existentes en España no son suficientemente largas, en general, y, además, parecen coincidir con épocas relativamente abundantes en aguas, lo cual, y la poca garantía que las citadas series generalmente merecen, es una de las razones que aconsejan un criterio de gran prudencia al apoyarse en las mismas para estimar la riqueza hidroeléctrica nacional.

Por otra parte, y como arriba hemos apuntado, a la gran irregularidad de los ríos españoles no permite computar las posibilidades hidroeléctricas en cuestión fundándonos en el *año medio*. Y si para subsanar tal irregularidad intentamos establecer embalses hiperanuales, las condiciones geológicas del suelo por una parte, las necesidades agronómicas del país por otra y la excepcional capacidad que habrían de tener aquéllos, limita notablemente tal medio de regulación.

A continuación, el que suscribe, al frente del Servicio de Hidrología de IBERDUERO, S. A., ha estudiado las cuencas del Esla en Bretó (Zamora), Duero en Villachica (Zamora) y Ebro en Cillaperlata (Burgos), llegando a las consecuencias que más adelante se compendian y que previamente justificadas afectan notablemente a lo que antecede en relación con la estimación de las posibilidades hidroeléctricas nacionales.

## CUENCA DEL DUERO

### Antecedentes.

IBERDUERO, S. A., dispone de una serie de aforos de treinta años, desde 1920 hasta la fecha, correspondiente a la estación instalada por dicha Sociedad en Villachica (Zamora), en la cual se ha venido, durante dicho período, estudiando ininterrumpidamente el régimen del río Duero referente a la cuenca vertiente a dicha estación.

Con arreglo a dicha serie, que merece completa garantía, se ha confeccionado el cuadro que figura a continuación, en el cual aparecen los caudales medios mensuales, los caudales medios anuales (módulos) y las aportaciones anuales del Duero en la mencionada estación.

Es de observar, como ya apuntábamos en la Introducción de este estudio, el elevado valor del coeficiente de irregularidad, que definido como la relación entre la aportación anual máxima y la mínima de la serie, alcanza el valor 7,58, elevadísimo con relación a las cifras 1,5 a 2, que corresponden a los principales cursos del centro de Europa.

### Características hidrológicas.

La cuenca del Duero en Villachica, con 41.800 Km<sup>2</sup> de superficie, presenta las siguientes características hidrológicas, según se deduce del examen del cuadro correspondiente:

Módulo máximo: 343,81 m<sup>3</sup>/s. (año 1936).

Módulo mínimo: 45,33 m<sup>3</sup>/s. (año 1949).

Módulo medio de la serie: 149,741 m<sup>3</sup>/s.

Coeficiente de irregularidad de la cuenca: 7,58.

## RIO DUERO EN LA ESTACIÓN DE VILLACHICA

CAUDALES MEDIOS ANUALES EN EL PERIODO 1920-1949

Curva de frecuencia

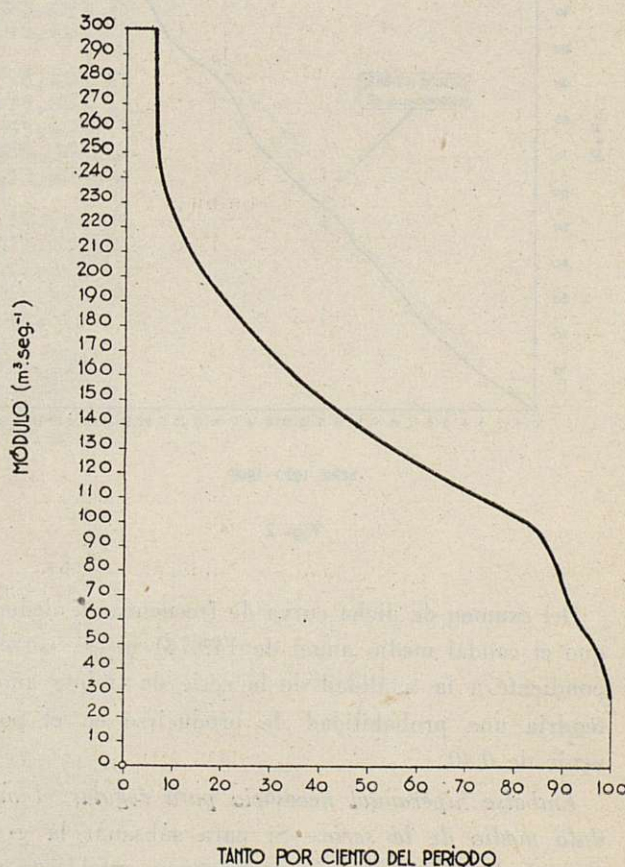


Fig. 1



*Curva de frecuencia de módulos.*—A continuación del cuadro anterior citado se incluye una curva de frecuencia de los caudales medios anuales correspondiente al período 1920-1949. Para serie suficientemente larga puede admitirse sin dificultad (ley de los grandes números de Bernouilli) que los distintos módulos se habrían presentado en proporción a sus posibilidades respectivas, por lo cual la curva en cuestión pudiera dar la medida más aproximada posible de la probabilidad con que cabría esperar la aparición en el porvenir de un caudal medio anual determinado.

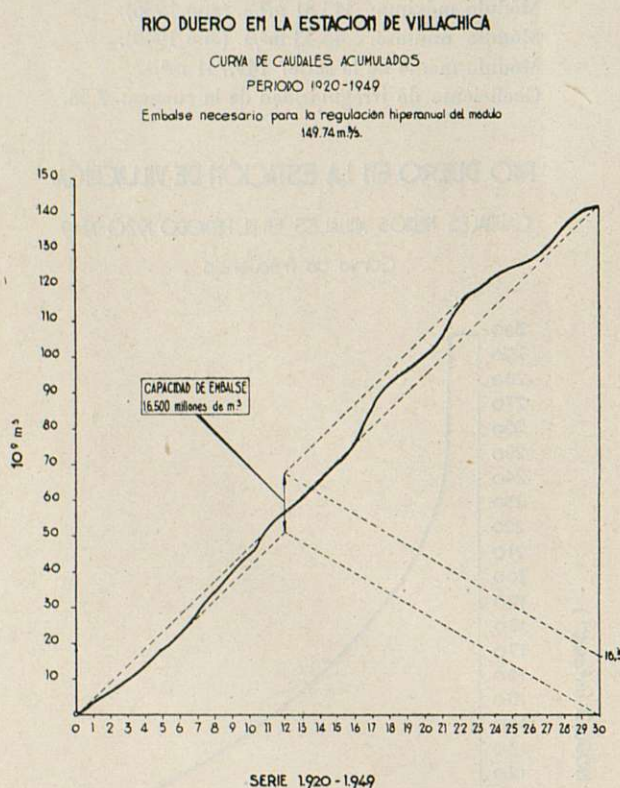


Fig. 2

Del examen de dicha curva de frecuencia se deduce que el caudal medio anual de 149,741 m<sup>3</sup>/s., correspondiente a la totalidad de la serie de treinta años, tendría una probabilidad de producirse en el porvenir de 0,40.

*Embalse hiperanual necesario para regular el módulo medio de la serie.*—Si para subsanar la gran irregularidad de este río quisiéramos establecer un embalse hiperanual que regulara el módulo medio

de la serie 149,741 m<sup>3</sup>/s., según se comprueba en el gráfico (fig. 2) que precede en el que, a partir de la curva de caudales acumulados en el período 1920-1949, se deduce la capacidad de embalse para regular hiperanualmente el citado módulo de 149,741 m<sup>3</sup>/s., la cual asciende a la elevada cifra de 16.500 millones de m<sup>3</sup>.

## CUENCA DEL ESLA

### Antecedentes

El año 1916 estableció IBERDUERO, S. A., la estación de Bretó (Zamora) en el río Esla con el fin de estudiar las aportaciones de éste al pantano de Ricobayo, regulador del salto del Esla.

Esta serie, que repetidas veces se ha revisado y criticado, es también como la del Duero de garantía absoluta, y ha servido para confeccionar el cuadro, correspondiente en el que aparecen los caudales medios mensuales, los caudales medios anuales (módulos) y las aportaciones medias anuales que corresponden a los treinta y cuatro años comprendidos entre el año 1916 y el actual. Es de observar que este río, lo mismo que el Duero, tiene elevado coeficiente de irregularidad que alcanza el valor de 6,94.

*Características hidrológicas.*—La cuenca del Esla en Bretó, de 14.263 Km<sup>2</sup> de superficie, tiene las siguientes características hidrológicas, según se deduce del cuadro que se incluye, que figuran a continuación:

Módulo máximo: 323,22 m<sup>3</sup>/s. (año 1936).

Módulo mínimo: 46,58 m<sup>3</sup>/s. (año 1949).

Módulo medio de la serie: 165,00 m<sup>3</sup>/s.

Coeficiente de irregularidad de la cuenca: 6,94.

*Curva de frecuencia de módulos.*—A continuación del cuadro citado se incluye una curva de frecuencia de los caudales medios anuales correspondientes al período 1916-1949 (figura 3). Como en el caso del Duero, y fundados en las mismas razones, puede admitirse que, en dicha curva de frecuencia, los distintos módulos se presentan en proporción a sus probabilidades respectivas y, por lo tanto, dicha curva en cuestión puede dar la medida aproximada de la probabilidad con que cabe esperar la aparición en el porvenir de un caudal medio anual determinado.

Del examen de dicha curva de frecuencia se dedu-



Cota del cero de la escala: 681,50 m.

CUENCA VERTIENTE HASTA LA ESTACION: 14.263 Km<sup>2</sup>

Estación en servicio desde 1924.

Mod. E. P. 52

	Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Módulo	Caudal máximo	Caudal mínimo	Aportación anual (10 <sup>6</sup> m. <sup>3</sup> )
Caudales medios mensuales (m. <sup>3</sup> seg. <sup>-1</sup> )	1916	306,56	264,43	661,06	428,70	438,40	101,30	37,20	8,50	6,60	18,50	292,97	674,60	270,63	2541,50	2,78	8557,850
	1917	333,10	522,40	441,10	300,10	467,60	129,80	24,20	4,60	6,90	23,20	80,20	40,80	196,00	1090,05	3,60	6181,134
	1918	321,60	136,10	123,90	268,10	178,80	47,60	5,69	1,00	33,50	173,50	131,70	93,00	126,18	1215,17	0,99	3979,228
	1919	278,80	765,20	388,30	294,30	200,80	63,50	15,90	2,80	4,29	33,90	231,10	180,90	201,06	1619,15	0,46	6340,775
	1920	180,60	181,74	314,80	345,60	130,80	67,50	10,90	1,40	2,90	110,60	138,60	168,90	137,59	943,17	0,67	4350,978
	1921	191,00	96,30	66,64	45,50	81,50	81,00	6,20	1,70	7,80	25,20	54,68	127,89	65,39	355,69	0,46	2062,137
	1922	248,61	323,34	326,37	420,24	160,00	92,28	7,13	1,17	1,77	129,35	234,87	126,56	171,28	1186,57	0,58	5401,499
	1923	180,02	324,58	360,55	354,80	158,17	43,88	8,13	1,31	0,57	5,52	81,96	123,90	135,60	989,59	0,50	4276,165
	1924	226,50	226,10	602,98	435,11	166,28	40,73	4,53	1,20	22,42	25,79	144,63	311,95	184,04	1712,60	0,99	5819,918
	1925	137,42	118,20	157,49	373,40	221,01	168,57	25,55	5,25	5,09	51,57	292,15	589,43	179,88	1653,83	1,80	5672,654
	1926	326,85	869,14	225,43	277,12	194,68	82,79	24,58	2,90	2,73	7,96	386,26	292,92	219,56	2025,35	1,80	6923,968
	1927	131,87	249,78	568,84	261,43	109,96	42,10	16,77	1,32	5,68	27,71	130,40	389,00	161,09	1570,00	1,00	5080,104
	1928	242,71	198,52	497,97	461,43	390,61	316,03	23,52	7,42	5,93	89,81	123,80	76,58	202,87	895,00	2,00	6415,200
	1929	116,97	249,39	255,58	87,83	73,29	38,07	28,58	1,05	3,30	24,84	304,30	500,87	139,32	1685,00	0,50	4375,858
	1930	266,32	281,46	445,03	545,83	329,48	196,37	59,61	6,16	6,83	59,39	50,80	243,74	207,32	1360,00	2,00	6530,198
	1931	285,90	209,46	597,42	311,27	182,61	53,00	11,85	1,24	8,70	59,90	294,33	135,61	179,16	1825,00	1,00	5650,171
	1932	121,77	60,17	201,58	138,47	155,06	76,60	43,61	9,77	22,60	72,97	116,87	664,03	139,48	1880,00	2,00	4410,720
	1933	300,20	316,70	505,00	224,70	177,60	39,30	15,10	1,30	11,60	77,90	202,70	134,10	166,68	1150,00	0,50	5265,358
	1934	167,60	120,30	270,00	483,20	357,30	123,90	15,30	3,90	2,02	8,50	28,90	408,90	165,61	1065,00	1,00	5222,581
	1935	121,74	183,70	423,90	148,40	179,90	111,70	10,92	0,73	0,26	14,90	132,20	417,10	145,63	1900,00	0,25	4592,662
	1936	828,30	869,80	809,10	798,60	288,40	122,30	47,60	4,90	3,30	23,90	50,90	56,30	323,22	1970,00	1,00	10221,098
	1937	306,70	587,40	504,26	475,80	199,30	81,20	19,80	0,80	0,60	29,90	246,80	354,50	231,35	1935,00	0,50	7295,918
	1938	257,50	176,89	136,60	55,80	70,30	12,80	0,70	0,50	34,40	25,50	89,10	280,00	94,86	875,00	0,50	2991,645
	1939	820,10	274,70	172,00	369,90	124,60	98,60	23,40	3,30	4,40	104,10	241,10	144,40	198,01	5132,00	2,00	6444,474
	1940	393,10	682,60	469,10	153,90	246,60	60,90	12,60	1,30	1,05	46,80	153,90	124,50	194,02	1380,00	0,50	6135,394
	1941	403,00	592,96	544,30	436,10	452,00	259,60	45,00	7,70	2,20	14,40	41,77	54,50	235,44	2070,00	0,50	7424,784
	1942	113,81	104,00	374,80	222,13	256,10	54,60	9,00	0,60	2,69	65,20	132,20	283,10	135,50	1153,00	0,25	4272,394
	1943	684,70	323,28	245,10	179,40	93,30	10,00	1,60	0,65	31,70	225,90	209,70	224,20	185,54	2425,00	0,40	5851,094
	1944	105,00	78,30	111,40	261,80	45,40	10,70	5,40	0,50	0,70	59,60	118,10	173,10	81,23	510,00	0,50	2568,754
	1945	102,52	233,00	177,03	118,57	32,10	7,60	7,17	0,85	0,23	1,51	113,14	289,87	88,94	675,00	0,20	2804,777
	1946	127,64	85,07	180,45	306,77	444,19	106,83	6,97	0,61	0,73	21,10	82,23	233,58	133,43	1460,00	0,20	4208,254
	1947	187,22	439,39	737,23	325,37	225,90	64,93	4,53	0,28	16,65	39,90	37,37	99,26	180,22	2060,00	0,20	5683,307
	1948	428,71	371,79	176,48	108,93	132,13	52,23	3,79	1,77	1,04	1,48	26,22	116,96	117,86	1420,00	0,80	3726,941
	1949	121,46	52,17	106,07	65,44	36,38	10,70	2,17	0,92	1,60	12,38	35,36	112,49	46,58	408,78	0,85	1468,995
	19																
	19																
	19																
	19																
	19																
Medias de la serie 1916-1944		289,60	323,69	372,43	315,83	211,03	90,58	19,32	2,93	8,47	56,42	163,34	255,01	174,95	Módulo máximo de la serie: 323,22		
Medias de la serie 1945-1949		193,51	236,28	275,59	184,94	174,14	84,46	3,73	0,89	4,05	15,27	58,92	170,43	113,41	Módulo mínimo de la serie: 46,58		
Medias de la serie 1916-1949		275,47	310,83	358,19	296,58	205,60	84,38	17,03	2,63	7,82	50,373	147,99	242,57	165,90	Coeficiente de irregularidad: 6,94		

Nota: Los años comprendidos entre 1916 y 1924 fueron obtenidos en la Estación de Muelas del Pan.







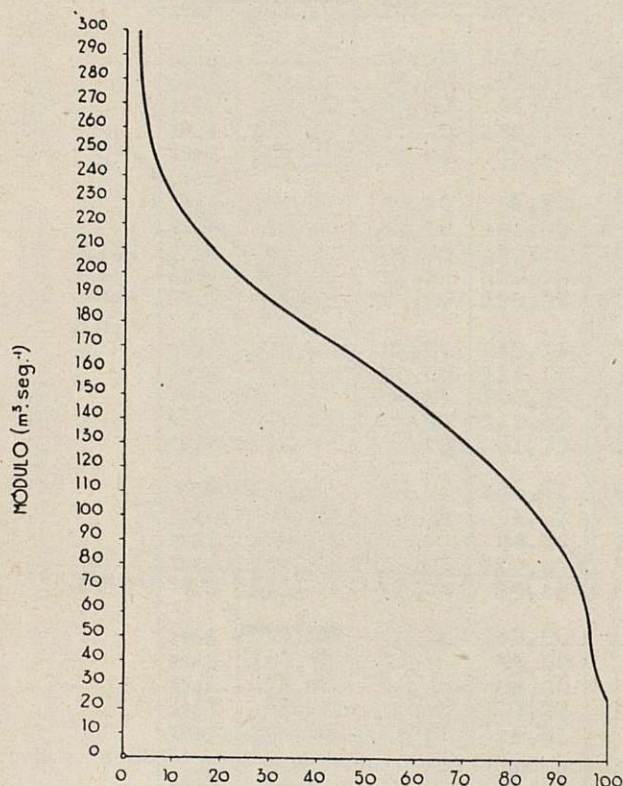
ce que el caudal medio anual de la serie,  $165,90 \text{ m}^3/\text{s}$ ., tiene en el porvenir una probabilidad de producirse de 0,47.

*Embalse hiperanual necesario para regular el módulo medio de la serie.*—Análogamente a lo que dijimos en el Duero, si para subsanar la gran irregularidad del Esla decidiéramos establecer un embalse hiperanual que regulara el módulo medio de la serie

### RIO ESLA EN LA ESTACION DE BRETO

CAUDALES MEDIOS ANUALES EN EL PERIODO 1916-1949

Curva de frecuencia



TANTO POR CIENTO DEL PERIODO

Fig. 3

$165,90 \text{ m}^3/\text{s}$ ., según se comprueba en el gráfico que va a continuación (fig. 4), en el que a partir de la curva de caudales acumulados en el período 1916-1949, se deduce la capacidad de embalse para regular hiperanualmente el citado módulo de  $165,90 \text{ m}^3/\text{s}$ ., la cual asciende a la elevada cifra de 11.800 millones de  $\text{m}^3$ .

### RIO ESLA EN LA ESTACION DE BRETO

CURVA DE CAUDALES ACUMULADOS

PERIODO 1916-1949

Embalse necesario para la regulación hiperanual del módulo  $165,90 \text{ m}^3/\text{s}$

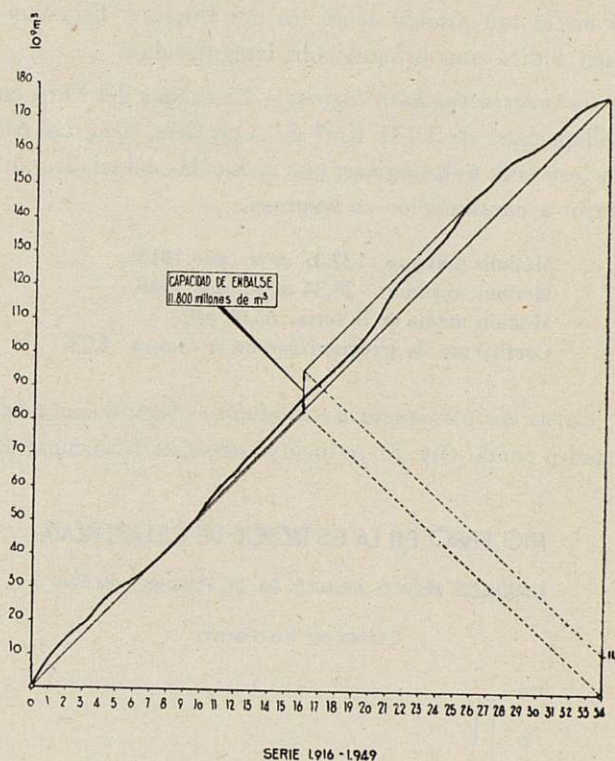


Fig. 4

### CUENCA DEL EBRO

#### Antecedentes

En 1914 estableció IBERDUERO, S. A., la estación de Aforos de Cillaperlata (Burgos) utilizando la presa del Salto de Quintana a fin de estudiar las aportaciones del Ebro aprovechadas en dicho Salto, en el de aguas abajo, de Puentelarrá (Burgos), y recientemente con el fin de conocer perfectamente el tramo hasta Miranda.

Esta serie de treinta y seis años ha sido recientemente rectificada para corregir algunas pequeñas anomalías subsiguientes al cambio de alzas móviles en el refetruido Salto de Quintana. Merece, como las anteriores del Duero y del Esla, absoluta garantía, y con ella se ha confeccionado el cuadro que aparece a continuación, en el que puede observarse los caudales medios mensuales, los módulos y las aportaciones anua-



les durante los treinta años, comprendidos entre el 1914 y el actual.

Es de destacar también el elevado coeficiente de irregularidad de este río, que alcanza el valor 4,23, que si no es tan grande como los del Duero y Esla también indica una pronunciada irregularidad.

**Características hidrológicas.**—La cuenca del Ebro en Cillaperlata, de 4.131 Km<sup>2</sup> de superficie, tiene las características hidrológicas, que deducidas del cuadro anterior a continuación se resumen:

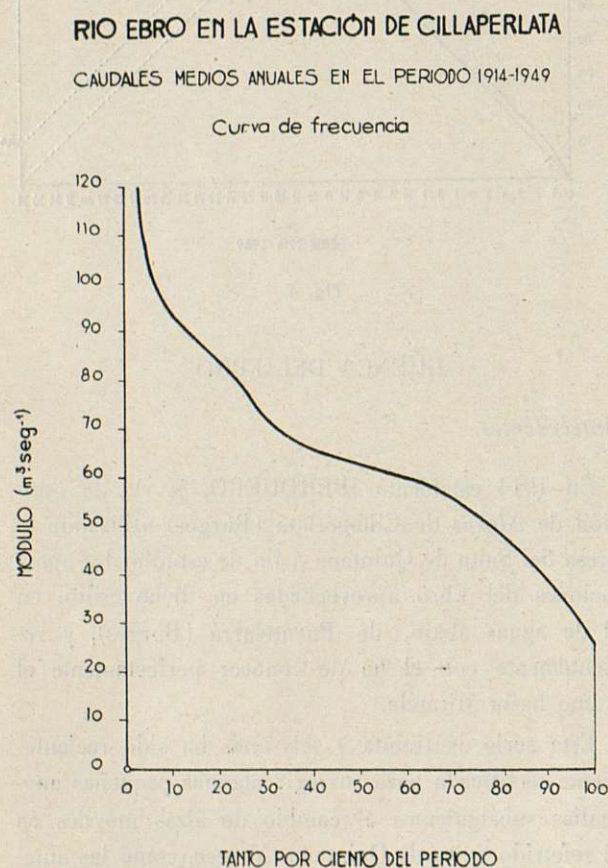
Módulo máximo: 122,07 m<sup>3</sup>/s. (año 1915).

Módulo mínimo: 28,34 m<sup>3</sup>/s. (año 1949).

Módulo medio de la serie: 65,08 m<sup>3</sup>/s.

Coefficiente de irregularidad de la cuenca: 4,23.

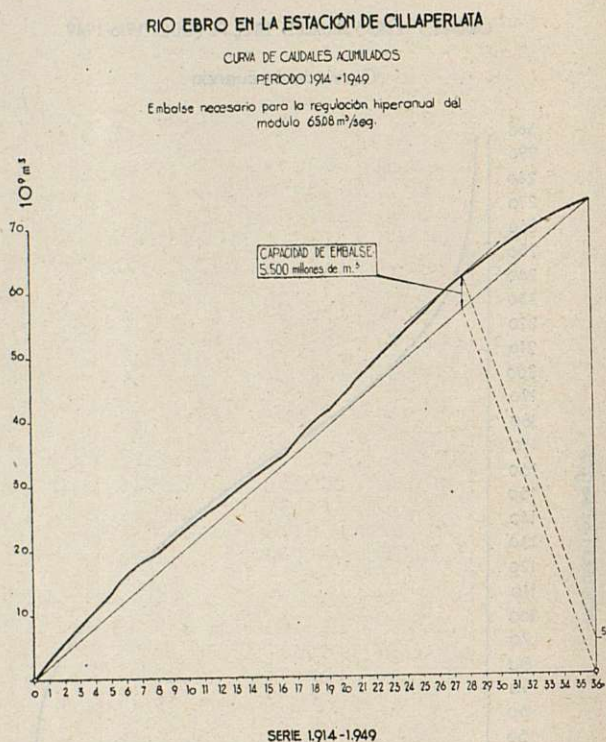
**Curva de frecuencia de módulos.**—Seguidamente al cuadro citado (fig. 5), se incluye curva de frecuencia de



los caudales medios anuales correspondientes al período 1914-1949. Como en el caso del Duero y del Esla,

y fundados en los mismos razonamientos, podemos admitir que en dicha curva de frecuencia los diferentes módulos se van presentando en proporción a sus probabilidades respectivas, y, por lo tanto, la referida curva de frecuencia puede dar, en cierto modo, medida aproximada de la probabilidad con que cabe esperar la aparición en el futuro de un caudal medio anual determinado.

Del examen de esta curva de frecuencia se deduce



que el caudal medio anual de la serie 65,08 m<sup>3</sup>/s. tiene en el futuro una probabilidad de producirse de 0,42.

**Embalse hiperanual necesario para regular el módulo medio de la serie.**—Análogamente a lo indicado para el Duero y el Esla, si con el fin de subsanar la irregularidad observada en el Ebro en Cillaperlata quisiéramos establecer un embalse hiperanual que regulara el módulo medio de la serie 65,08 m<sup>3</sup>/s., según se comprueba en el gráfico que va a continuación del anterior (fig. 6), en el que a partir de la curva de caudales acumulados en el período 1914-1949, se deduce la capacidad de embalse para regular hiperanualmente el ci-



	Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Módulo	Caudal máximo	Caudal mínimo	Aportación anual (10 <sup>6</sup> m. <sup>3</sup> )
Caudales medios mensuales (m. <sup>3</sup> seg. <sup>-1</sup> )	1914	114,90	276,40	168,80	76,90	69,80	60,40	26,20	10,20	8,20	23,80	46,60	64,40	78,86	-	-	2.486,9
	1915	169,90	211,70	154,30	228,00	158,80	113,50	20,60	11,90	19,40	80,80	99,50	174,50	122,07	-	-	3.349,6
	1916	76,80	224,50	210,90	109,10	59,60	22,40	16,20	9,20	10,20	10,40	18,80	106,80	72,91	-	-	2.305,5
	1917	144,00	141,80	165,90	256,10	77,20	29,30	14,10	9,60	8,30	15,30	76,00	38,30	81,32	-	-	2.564,5
	1918	227,30	35,30	152,20	170,20	72,20	33,10	11,40	8,40	16,60	115,50	80,20	86,70	84,09	-	-	2.651,8
	1919	199,90	207,00	160,10	181,20	71,20	20,20	12,00	8,40	12,90	63,90	177,80	113,70	97,86	-	-	3.086,1
	1920	120,20	33,40	167,20	17,10	47,50	21,60	12,20	8,90	9,30	22,30	45,30	100,20	50,43	-	-	1.594,7
	1921	76,80	34,80	35,30	39,10	81,70	61,20	12,60	10,10	10,30	8,50	11,10	91,70	39,43	-	-	1.243,5
	1922	208,50	109,40	95,20	175,30	76,60	25,30	11,00	8,00	13,50	13,40	37,10	18,00	65,94	-	-	2.079,5
	1923	105,30	116,40	124,60	54,20	31,80	17,20	12,80	7,50	10,30	9,60	60,80	186,60	60,59	-	-	1.910,7
	1924	114,20	84,30	166,10	133,70	31,10	12,70	8,20	6,80	8,50	10,70	18,80	45,80	53,41	-	-	1.688,9
	1925	18,00	38,50	105,10	260,00	63,70	61,60	16,80	10,50	8,90	15,20	69,70	69,20	61,43	-	-	1.937,3
	1926	62,90	167,80	54,70	78,10	109,60	28,30	11,90	7,70	7,60	8,60	29,90	99,90	55,60	-	-	1.753,4
	1927	175,40	110,00	152,40	57,70	27,70	14,60	9,70	7,60	9,00	14,30	50,30	109,00	61,47	750,0	6,00	1.938,5
	1928	115,00	114,90	72,40	76,20	65,10	35,70	11,10	7,60	7,10	22,70	58,80	61,00	53,97	238,8	6,40	1.706,6
	1929	84,50	130,40	56,70	30,60	28,80	29,50	11,30	8,40	11,10	19,30	112,90	58,90	48,53	358,0	6,50	1.530,4
	1930	80,20	157,40	181,60	223,10	105,70	80,20	44,80	14,70	10,80	31,20	19,90	164,00	92,77	600,0	9,00	2.925,6
	1931	90,70	303,70	229,10	97,40	70,80	24,20	19,70	13,80	10,20	11,50	80,90	110,50	88,50	707,0	8,80	2.790,9
	1932	53,50	19,82	60,79	60,27	52,50	60,56	53,11	19,74	12,50	20,89	60,14	106,70	48,38	475,5	10,70	1.529,9
	1933	80,42	132,00	196,35	61,80	58,65	81,10	30,38	10,30	9,90	13,61	117,64	95,60	73,99	858,3	8,20	2.333,3
	1934	173,45	107,04	249,18	137,89	120,32	50,26	14,51	13,33	9,59	10,04	54,94	87,00	85,63	614,35	7,60	2.700,4
	1935	81,32	180,62	114,14	41,00	68,42	47,79	11,90	12,16	8,61	38,11	33,69	131,36	64,09	548,72	7,70	2.021,1
	1936	141,51	176,51	208,25	188,27	175,11	78,77	32,29	18,18	16,29	34,56	68,55	82,31	101,69	474,33	9,50	3.215,6
	1937	77,65	105,75	141,42	114,59	50,85	53,65	26,11	10,50	10,76	23,85	41,55	123,32	65,00	586,00	8,80	2.049,8
	1938	107,77	106,09	61,73	20,69	21,63	11,10	8,80	7,80	57,83	40,02	61,81	184,73	57,50	688,54	6,60	1.813,3
	1939	286,57	108,13	146,61	143,13	78,14	67,40	14,08	11,52	10,82	47,00	87,67	97,00	91,51	712,60	8,80	2.885,9
	1940	76,32	112,89	51,07	64,39	110,76	50,58	18,14	17,21	13,93	48,51	57,27	106,19	60,61	623,20	8,60	1.916,6
	1941	166,28	183,47	78,85	52,33	96,58	72,79	19,79	20,84	11,18	13,09	35,87	57,70	67,40	688,09	9,20	2.125,5
	1942	119,41	122,74	102,07	82,26	61,13	17,97	15,08	18,18	24,08	22,39	13,57	24,75	51,97	477,63	7,80	1.638,9
	1943	121,52	94,13	75,45	49,93	74,95	10,94	8,19	6,92	11,81	22,54	94,75	107,70	56,53	373,74	6,20	1.782,7
	1944	56,00	63,84	142,50	82,18	37,97	12,61	9,55	7,39	8,82	69,11	96,23	134,50	60,06	593,61	6,80	1.899,2
	1945	106,76	141,66	51,00	34,46	21,03	11,20	8,88	12,35	7,97	9,08	20,88	46,51	39,30	388,02	7,14	1.239,4
	1946	28,70	58,20	66,80	80,10	124,40	38,70	10,70	8,40	7,70	8,10	23,20	86,20	45,10	292,90	6,80	1.422,3
	1947	59,28	93,35	117,27	38,40	53,84	15,08	11,00	20,92	22,97	19,75	21,49	74,90	45,69	404,02	8,16	1.440,9
	1948	129,00	63,70	16,51	38,17	40,13	11,31	12,22	12,49	13,47	7,93	9,24	10,64	30,40	361,94	5,44	961,3
	1949	51,75	11,19	76,65	17,68	20,53	13,81	24,12	25,19	14,87	17,50	18,62	50,33	28,84	617,58	6,12	909,5
	19																
	19																
	19																
	19																
Medias de la serie	1914-31	121,36	138,76	136,26	125,78	69,38	38,39	15,70	9,41	10,68	27,61	60,79	94,40	70,51	Módulo máximo de la serie: 122,07		
															Módulo mínimo de la serie: 28,84		
Medias de la serie	1932-49	106,51	104,51	108,70	72,64	70,39	39,20	18,27	14,08	15,17	25,89	50,95	89,30	59,65	Coeficiente de irregularidad: 4,23		
Medias de la serie	1914-49	113,94	121,63	122,48	99,21	69,88	38,79	16,98	11,74	12,92	26,75	55,87	91,85	65,08			







tado módulo de  $65,08 \text{ m}^3/\text{s}$ ., la cual asciende al elevado valor de  $5.500 \text{ millones de m}^3$ .

*Características de la sequía del año 1949 en las cuencas del Duero (Villachica), Esla (Bretó) y Ebro (Cillaperlata).*—Es de especial interés, para confirmar lo indicado sobre la gran irregularidad de nuestras cuencas, el poner de relieve las características hidrológicas de las mismas el pasado año 1949, comparando las aportaciones en éste con las correspondientes al año medio.

Con tal fin, a continuación damos dichos datos hidrológicos, característicos de la sequía de 1949, correspondientes a la cuenca del Duero en Villachica (Zamora), la del Esla en Bretó (Zamora) y la del Ebro en Cillaperlata (Burgos).

*Cuenca del Duero en Villachica (Zamora).*—También tienen especial interés las siguientes características correspondientes a esta cuenca:

Aportación media anual del período 1920-1949.....	$4.722 \times 10^6 \text{ m}^3$
Aportación media anual del 1949 .....	$1.429 \times 10^6 \text{ m}^3$

Por lo tanto, la aportación del Duero en Villachica el pasado año 1949 ha sido únicamente un 30 por 100 de la aportación media del período de treinta años, comprendido entre 1920 y 1949 inclusive.

*Cuenca del Esla en Bretó (Zamora).*—También tienen especial interés las siguientes características correspondientes a esta cuenca:

Aportación media anual del período 1916-1949.....	$5.232 \times 10^6 \text{ m}^3$
Aportación media anual del 1949 .....	$1.496 \times 10^6 \text{ m}^3$

La aportación del Esla en Bretó el año 1949, ha sido solamente un 28 por 100 de la aportación media anual correspondiente al período de treinta y cuatro años comprendido entre 1916 y 1949.

*Cuenca del Ebro en Cillaperlata (Burgos).*—Merecen también destacarse las características siguientes:

Aportación media anual del período 1914-1949.....	$2.052 \times 10^6 \text{ m}^3$
Aportación media anual del 1949 .....	$910 \times 10^6 \text{ m}^3$

En consecuencia, la aportación del Ebro en Cilla-

perlata el año 1949 ha sido únicamente un 44 por 100 de la aportación media anual de la serie de treinta y seis años, comprendida entre 1914 y 1949.

## CICLOS DE VARIACIÓN CLIMÁTICA. CUENCA DEL DUERO

### Introducción

Al principio de este trabajo habíamos indicado cómo las series de aforos existentes en España, aparte de ser cortas, proceden seguramente de períodos en los que han predominado las aguas altas. Para comprobar ésto, y ante la carencia de datos foronómicos, es interesante tratar de determinar, caso de que existan, ciclos de variación climática que nos puedan orientar sobre el particular.

En nuestro caso, afrontamos el estudio de la cuenca del Duero, en Villachica, mas al disponer solamente de serie de aforos de treinta años, correspondientes al período 1920-1949, serie muy corta para sacar consecuencias sobre una posible periodicidad climática, hemos empleado las tres series más largas de precipitaciones pluviométricas que, proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional, nos dan para la cuenca del Duero las lluvias en Soria, Burgos y Valladolid. Estas series, que datan de 1861, son las más completas y extensas que conocemos en dicha cuenca del Duero. A su vez, como nos interesan las precipitaciones medias anuales sobre dicha cuenca y no disponemos de tales datos en un período tan prolongado como el de las anteriores series, hemos determinado, como más adelante se justifica, una relación que liga las precipitaciones en Soria, Burgos y Valladolid con la precipitación media en la cuenca; de esta forma hemos conseguido disponer de valores de la precipitación media en la cuenca del Duero correspondiente a un período de noventa años, el cual ya es susceptible de análisis para tratar de encontrar en él alguna periodicidad.

De esta forma, y establecida por otra parte correlación matemática entre las aportaciones del Duero en Villachica, correspondientes al período 1920-1949, y las correspondientes lluvias medias en la cuenca, deducidas de las tres series anteriormente citadas, se ha



encontrado factor de correlación elevado ( $r = 0,905$ ), que autoriza a hacer extensivas a los caudales las consecuencias que sobre la susodicha periodicidad climática se deduzcan para las lluvias.

En el cuadro I, que figura a continuación, aparecen las tres series de precipitaciones pluviométricas de Soria, Burgos y Valladolid, las cuales van a servir de base a la investigación de los ciclos.

**Precipitación media de la cuenca.**—Como hemos dicho, las tres series disponibles de precipitaciones en Soria, Burgos y Valladolid, no caracterizan *a priori* las precipitaciones medias en la cuenca del Duero. Ante la carencia de otros datos sobre el particular, hemos tratado de establecer una relación que ligue las tres series anteriores con la citada precipitación media en la cuenca, para lo cual hemos establecido como hipótesis previa (que pueda rectificarse *a posteriori*) una distribución de lluvias tal que las líneas de nivel, que pasan por Soria, Burgos y Valladolid, fueran isoyetas. Esto supuesto, según se desprende del adjunto mapa de la cuenca en cuestión, tendríamos una distribución de lluvias proporcional a las siguientes superficies:

Isoyeta de SORIA .....	$f_1 = 6.88 \text{ Km}^2$
Isoyeta de BURGOS .....	$f_2 = 12.540 \text{ Km}^2$
Isoyeta de VALLADOLID ..	$f_3 = 22.572 \text{ Km}^2$
Cuenca total....	$F = 41.800 \text{ Km}^2$

De esta forma, denominando:

$h_1$	precipitación media anual en SORIA.
$h_2$	» » » en BURGOS.
$h_3$	» » » en VALLADOLID.
$h$	» » » en la cuenca del Duero.

resulta

$$h = \frac{f_1 h_1 + f_2 h_2 + f_3 h_3}{F} = \frac{f_1}{F} h_1 + \frac{f_2}{F} h_2 + \frac{f_3}{F} h_3$$

relación que, tenidos en cuenta los valores arriba figurados, se reduce a

$$h = 0,16 h_1 + 0,30 h_2 + 0,54 h_3$$

Para someter a crítica esta relación la hemos computado con la precipitación media anual en la cuenca del Duero el año 1949, la cual, según el Servicio Me-

tereológico Nacional, es de 456,94 mm. Y al tomar en cuenta que en dicho año hemos tenido 551 mm. en Soria, 466,3 en Burgos y 295,5 en Valladolid, la fórmula anterior nos ha dado

$$h = 387,62 \text{ mm.}$$

resultado que, comparado con la precipitación *real* citada, nos indica hemos de aplicar a la relación anterior un factor de corrección

$$\frac{456,94}{387,62} = 1,18$$

En resumen, y una vez corregida, la citada relación se transforma en la siguiente:

$$h = 0,18 h_1 + 0,35 h_2 + 0,65 h_3$$

que en lo sucesivo nos va a servir para determinar las precipitaciones medias en la cuenca del Duero, en función de los datos pluviométricos de las tres series, tantas veces citadas, de Soria, Burgos y Valladolid.

**Investigación de la periodicidad en las precipitaciones.**—Al estudiar la variabilidad de las lluvias se ha intentado descubrir la existencia de períodos que quedaban encubiertos, ya por la superposición de varios, ya por la intromisión de influencias de carácter aleatorio. Para destacarlos, un procedimiento sería sencillo: bastaría sumar las precipitaciones de los años homólogos y obtener las medidas correspondientes, de donde habrían desaparecido o donde se habrían atenuado las influencias extrañas al período de estudio; mas esto exige se conozca previamente la duración del período o que se le suponga, por comparación, con la de otro fenómeno natural que se considere más o menos relacionado con la producción de la lluvia.

Un período que ha estado bastante en boga es el de treinta y cinco años aproximadamente, preconizado por el Profesor Brückner (que más bien lo alarga hasta 36), que había él deducido de sus estudios sobre las fluctuaciones del nivel del mar Caspio y del algunas otras cuencas cerradas del Asia Central, y que más tarde trató de extender a otros fenómenos meteorológicos y a regiones mucho más extensas que las consideradas primeramente, hasta el punto de considerarlo como ley universal y tratar de relacionarlo por esta misma universalidad a fenómenos astronómicos, que



**CUADRO I**  
**PRECIPITACIONES ANUALES**  
(mm. de altura de agua)

Año hidrológico: 1.º de octubre a 1.º de octubre

Año	Soria	Burgos	Valladolid	Año	Soria	Burgos	Valladolid
1858-59	—	—	—	1903-04	536,5	539,8	579,0
1859-60	—	—	—	1904-05	502,3	371,6	294,0
1860-61	—	—	—	1905-06	542,9	378,5	343,8
1861-62	—	—	477,6	1906-07	425,0	322,0	238,0
1862-63	—	396,0	241,1	1907-08	651,0	600,0	443,0
1863-64	—	468,8	295,7	1908-09	485,0	392,0	281,0
1864-65	—	533,1	406,6	1909-10	531,0	507,0	419,0
1865-66	921,5	—	418,9	1910-11	433,0	437,0	417,0
1866-67	614,4	—	455,1	1911-12	608,6	537,0	487,0
1867-68	516,3	321,4	166,3	1912-13	563,5	356,3	239,5
1868-69	807,8	577,5	258,6	1913-14	465,4	506,9	459,3
1869-70	367,3	—	785,0	1914-15	808,3	548,8	459,1
1870-71	720,5	530,4	388,0	1915-16	606,0	501,0	430,4
1871-72	560,7	474,8	286,2	1916-17	627,8	422,3	330,0
1872-73	546,9	653,0	251,4	1917-18	693,2	308,2	286,0
1873-74	440,2	570,3	285,2	1918-19	569,3	598,9	380,8
1874-75	554,5	479,4	186,6	1919-20	616,6	448,4	327,8
1875-76	448,0	401,1	253,5	1920-21	480,7	482,0	459,8
1876-77	885,4	762,0	505,8	1921-22	520,1	428,7	258,0
1877-78	404,2	416,7	320,9	1922-23	589,3	475,1	257,8
1878-79	1.063,9	595,4	316,9	1923-24	521,9	412,3	418,6
1879-80	667,7	623,2	356,5	1924-25	410,0	420,5	472,0
1880-81	762,8	762,1	408,6	1925-26	521,7	527,4	458,1
1881-82	767,0	462,0	256,0	1926-27	546,9	559,7	492,5
1882-83	373,0	563,0	310,0	1927-28	636,7	670,7	594,4
1883-84	419,0	591,0	306,0	1928-29	379,6	568,4	296,7
1884-85	549,0	691,0	313,0	1929-30	661,9	729,0	515,5
1885-86	648,0	665,0	376,0	1930-31	459,8	517,4	380,2
1886-87	488,0	023,0	261,0	1931-32	556,5	595,7	394,4
1887-88	679,0	599,0	312,0	1932-33	634,2	632,6	451,4
1888-89	616,0	814,0	455,0	1933-34	529,5	486,0	416,5
1889-90	374,0	517,0	241,0	1934-35	542,6	464,3	375,2
1890-91	284,0	429,0	228,0	1935-36	836,5	823,6	810,6
1891-92	599,0	709,0	461,0	1936-37	522,8	605,0	503,2
1892-93	442,0	581,0	292,0	1937-38	521,5	394,0	425,1
1893-94	443,0	534,0	271,0	1938-39	512,7	640,1	493,5
1894-95	667,0	680,0	338,9	1939-40	588,6	663,5	501,6
1895-96	324,0	311,0	246,0	1940-41	903,9	769,9	578,6
1896-97	442,0	545,0	371,0	1941-42	475,5	486,9	396,2
1897-98	428,0	374,0	271,0	1942-43	589,7	399,7	440,1
1898-99	482,0	448,0	252,0	1943-44	426,0	483,6	275,6
1899-00	567,0	602,0	479,0	1944-45	320,0	323,2	268,8
1900-01	722,6	502,3	382,6	1945-46	616,4	422,4	401,3
1901-02	665,4	413,8	523,4	1946-47	767,2	563,1	484,5
1902-03	561,3	503,0	548,0	1947-48	616,0	454,9	300,0
				1948-49	551,0	466,3	295,5



## Hipótesis sobre la repartición de las lluvias





**CUADRO II**  
**S O R I A**  
**ESTUDIO DE LA PERIODICIDAD DE LAS LLUVIAS**

Año hidrológico: 1.º de octubre a 1.º de octubre

Año	Lluvia (mm.)	Año	Lluvia (mm.)	Año	Lluvia (mm.)	Media años homólogos (mm.)	Media quin- quenal de las anteriores (mm.)
1861-62	—	1896-97	442,0	1931-32	556,5	499,25	573,55
1862-63	—	1897-98	428,0	1932-33	534,2	481,10	
1863-64	—	1898-99	482,0	1933-34	529,5	505,75	
1864-65	—	1899-00	567,0	1934-35	542,6	554,80	
1865-66	921,5	1900-01	722,6	1935-36	836,5	826,86	
1866-67	616,4	1901-02	665,4	1936-37	522,8	601,20	592,34
1867-68	516,3	1902-03	561,3	1937-38	521,5	533,00	
1868-69	807,8	1903-04	536,5	1938-39	512,7	619,00	
1869-70	367,3	1904-05	502,3	1939-40	588,6	486,06	
1870-71	720,5	1905-06	542,9	1940-41	903,9	722,43	
1871-72	560,7	1906-07	425,0	1941-42	475,5	487,06	500,18
1872-73	546,9	1907-08	651,0	1942-43	589,7	595,86	
1873-74	440,2	1908-09	485,0	1943-44	426,0	450,40	
1874-75	554,5	1909-10	531,0	1944-45	320,0	468,50	
1875-76	448,0	1910-11	433,0	1945-46	616,4	499,10	
1876-77	885,4	1911-12	608,6	1946-47	767,2	753,73	679,43
1877-78	404,2	1912-13	563,5	1947-48	616,0	527,90	
1878-79	1.063,0	1913-15	465,4	1948-49	551,0	693,13	
1879-80	667,7	1914-15	808,3	1949-50	—	738,00	
1880-81	762,8	1915-16	606,0	1950-51	—	684,40	
1881-82	767,0	1916-17	627,8	1951-52	—	697,40	574,36
1882-83	373,0	1917-18	693,2	1952-53	—	533,10	
1883-84	419,0	1918-19	569,3	1953-54	—	494,15	
1884-85	549,0	1919-20	616,6	1954-55	—	582,80	
1885-86	648,0	1920-21	480,7	1955-56	—	564,35	
1886-87	488,0	1921-22	520,1	1956-57	—	504,05	500,40
1887-88	679,0	1922-23	589,3	1957-58	—	634,15	
1888-89	616,0	1923-24	521,9	1958-59	—	568,95	
1889-90	374,0	1924-25	410,0	1959-60	—	392,00	
1890-91	284,0	1925-26	521,7	1960-61	—	402,85	
1891-92	599,0	1926-27	546,9	1961-62	—	572,95	516,00
1892-93	442,0	1927-28	636,7	1962-63	—	539,15	
1893-94	443,0	1928-29	379,6	1963-64	—	411,30	
1894-95	667,0	1929-30	661,9	1964-65	—	664,45	
1895-96	324,0	1930-31	459,8	1965-66	—	391,90	



**CUADRO III**  
**BURGOS**  
**ESTUDIO DE LA PERIODICIDAD DE LAS LLUVIAS**

Año hidrológico: 1.º de octubre a 1.º de octubre

Año	Lluvia (mm.)	Año	Lluvia (mm.)	Año	Lluvia (mm.)	Media años homólogos (mm.)	Media quin- quenal de las anteriores (mm.)
1861-62	—	1896-97	545,0	1931-32	595,7	570,35	540,31
1862-63	396,0	1897-98	374,0	1932-33	632,6	467,53	
1863-64	468,8	1898-99	448,0	1933-34	486,0	467,60	
1864-65	533,1	1899-00	602,0	1934-35	464,3	533,13	
1865-66	—	1900-01	502,3	1935-36	823,6	662,95	
1866-67	—	1901-02	413,8	1936-37	605,0	509,40	509,03
1867-68	321,4	1902-03	503,0	1937-38	394,0	406,13	
1868-69	577,5	1903-04	539,8	1938-39	540,1	552,46	
1869-70	—	1904-05	371,6	1939-40	663,5	517,55	
1870-71	530,4	1905-06	378,5	1940-41	769,9	559,60	
1871-72	474,8	1906-07	322,0	1941-42	486,9	427,90	463,59
1872-73	653,0	1907-08	600,0	1942-43	399,7	550,90	
1873-74	570,3	1908-09	392,0	1943-44	483,6	481,96	
1874-75	479,4	1909-10	507,0	1944-45	323,2	436,53	
1875-76	401,1	1910-11	437,0	1945-46	422,4	420,16	
1876-77	762,0	1911-12	537,0	1946-47	563,1	620,70	554,08
1877-78	416,7	1912-13	356,3	1947-48	454,9	409,30	
1878-79	595,4	1913-14	506,9	1948-49	466,3	522,86	
1879-80	623,2	1914-15	548,8	1949-50	—	586,00	
1880-81	762,1	1915-16	501,0	1950-51	—	631,55	
1881-82	462,0	1916-17	422,3	1951-52	—	442,15	523,19
1882-83	563,0	1917-18	308,2	1952-53	—	435,60	
1883-84	591,0	1918-19	598,9	1953-54	—	595,00	
1884-85	691,0	1919-20	448,4	1954-55	—	569,70	
1885-86	665,0	1920-21	482,0	1955-56	—	573,50	
1886-87	523,0	1921-22	428,7	1956-57	—	475,85	514,59
1887-88	599,0	1922-23	475,0	1957-58	—	537,00	
1888-89	814,0	1923-24	412,3	1958-59	—	613,15	
1889-90	517,0	1924-25	420,5	1959-60	—	468,75	
1890-91	429,0	1925-26	527,4	1960-61	—	478,20	
1891-92	709,0	1926-27	559,9	1961-62	—	634,45	586,04
1892-93	581,0	1927-28	670,7	1962-63	—	625,85	
1893-94	534,0	1928-29	568,4	1963-64	—	551,20	
1894-95	680,0	1929-30	729,0	1964-65	—	704,50	
1895-96	311,0	1930-31	517,4	1965-66	—	414,20	



**CUADRO IV**  
**VALLADOLID**  
**ESTUDIO DE LA PERIODICIDAD DE LAS LLUVIAS**  
Año hidrológico: 1.º de octubre a 1.º de octubre

Año	Lluvia (mm.)	Año	Lluvia (mm.)	Año	Lluvia (mm.)	Media años homólogos (mm.)	Media quin- quenal de las anteriores (mm.)
1861-62	477,6	1896-97	371,0	1931-32	394,4	414,33	402,90
1862-63	241,1	1897-98	271,0	1932-33	451,4	321,16	
1863-64	295,7	1898-99	252,0	1933-34	416,5	321,40	
1864-65	406,6	1899-00	479,0	1934-35	475,2	420,26	
1865-66	418,9	1900-01	382,6	1935-36	810,6	537,36	
1866-67	455,1	1901-02	523,4	1936-36	503,2	493,90	416,21
1867-68	166,3	1902-03	548,0	1937-37	425,1	379,80	
1869-69	258,6	1903-04	579,0	1938-38	493,5	443,70	
1869-70	185,0	1904-05	294,0	1939-39	501,6	326,86	
1870-71	388,0	1905-06	343,8	1940-41	578,6	436,80	
1871-72	286,2	1906-07	238,0	1941-42	396,2	306,80	318,85
1872-73	251,4	1907-08	443,0	1942-43	440,1	378,16	
1873-74	285,2	1908-09	281,0	1943-44	275,6	280,60	
1874-75	186,6	1909-10	419,0	1944-43	208,8	271,46	
1875-76	253,3	1910-11	417,0	1945-46	401,3	357,26	
1876-77	505,8	1911-12	487,0	1946-47	484,5	492,43	392,75
1877-78	320,9	1912-13	239,5	1947-48	300,0	286,80	
1878-79	316,9	1913-14	459,3	1948-49	295,5	357,23	
1879-80	356,5	1914-15	459,1	1949-50	—	407,80	
1880-81	408,6	1915-16	430,4	1950-51	—	419,50	
1881-82	256,0	1916-17	330,0	1951-52	—	293,00	334,54
1882-83	310,0	1911-18	286,0	1952-53	—	298,00	
1883-84	306,0	1918-19	380,8	1953-54	—	343,40	
1884-85	313,0	1919-20	327,8	1954-55	—	320,40	
1885-86	376,0	1920-21	459,8	1955-56	—	417,90	
1886-87	261,0	1921-22	258,0	1956-57	—	259,50	336,15
1887-88	312,0	1922-23	257,8	1957-58	—	284,90	
1888-89	455,0	1923-24	418,6	1958-59	—	436,80	
1889-90	241,0	1924-25	472,0	1959-60	—	356,50	
1890-91	228,0	1925-26	458,1	1960-61	—	343,05	
1891-92	461,0	1926-27	492,5	1961-62	—	476,75	398,73
1892-93	292,0	1927-28	594,4	1962-63	—	443,20	
1893-94	271,0	1928-29	396,7	1963-64	—	333,85	
1894-95	338,0	1929-30	515,5	1964-65	—	426,75	
1895-96	246,0	1930-31	380,2	1965-66	—	313,10	



## CUENCA DEL DUERO

PERIODICIDAD DEDUCIDA PARA LAS LLUVIAS  
EN SORIA, BURGOS Y VALLADOLID.

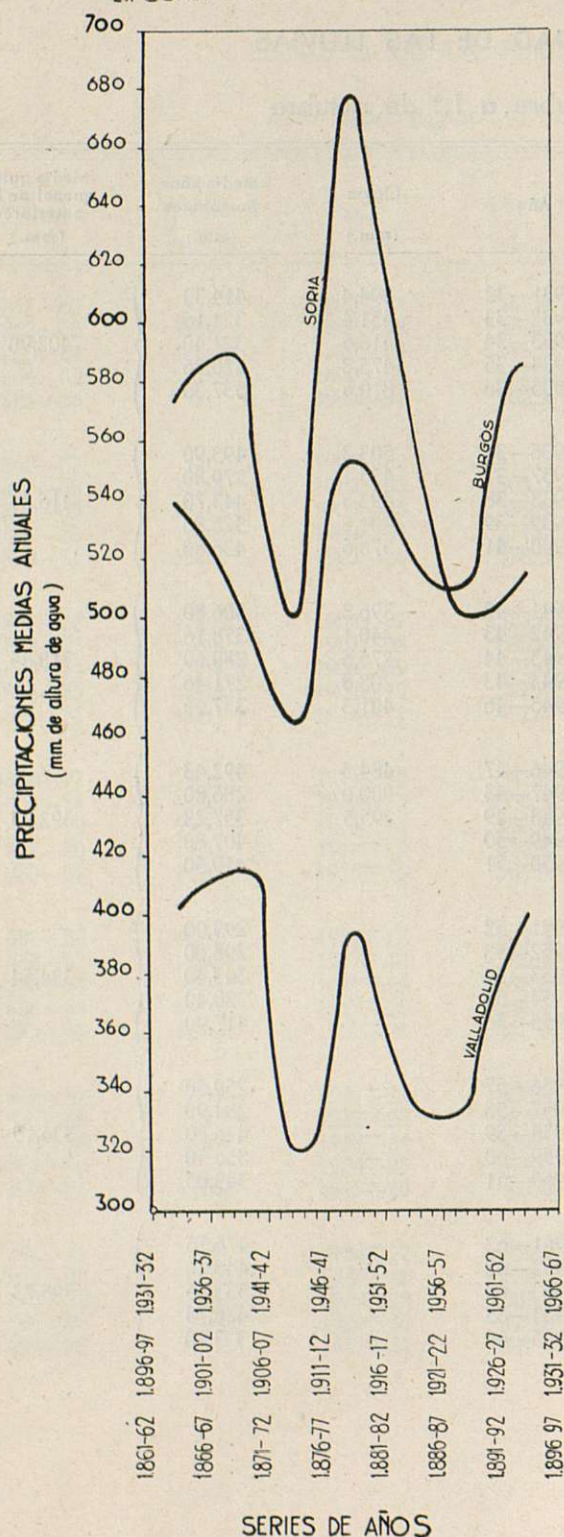


Fig. 7

para este caso podrían haber sido también las manchas solares.

Ante otra cosa en que apoyarnos, y aun cuando no los admitamos como verdad incontrovertible, supongamos *a priori* la existencia de ciclos climáticos de treinta y cinco años, de Brückner, y sumando los años homólogos, según el método más arriba indicado, hemos obtenido unos ciclos para las precipitaciones en Soria, Burgos y Valladolid, respectivamente, cuya deducción, que aparece en los cuadros II, III y IV, se resume en el gráfico adjunto (fig. 7).

Con los períodos deducidos para las lluvias en Soria, Burgos y Valladolid, y mediante la relación

$$h = 0,18 h_1 + 0,35 h_2 + 0,65 h_3$$

que liga aquellas con la precipitación media de la cuenca, hemos llegado a los siguientes resultados, que a continuación se compendian:

0,18 $h_1$	0,35 $h_2$	0,65 $h_3$	H
103	189	262	554
107	178	270	555
90	162	207	459
122	194	255	571
103	183	217	503
90	179	218	487
93	205	259	557

En el cuadro anterior se denomina  $H$  los valores quinquenales cíclicos de las precipitaciones medias en la cuenca del Duero. Del mismo, dedúcese el gráfico adjunto (fig. 8) en el que figura una variación cíclica de las lluvias medias sobre la cuenca del Duero en Villachica; de la observación de dicho gráfico, en el que aparece claramente el bache correspondiente al período de sequía actual, puede observarse cómo en la época comprendida entre 1920 y la fecha actual (época a la que corresponden la mayoría de las series de aforos existentes) predominan las grandes precipitaciones.



## CUENCA DEL DUERO

PERIODICIDAD DEDUCIDA PARA LAS PRECIPITACIONES MEDIAS ANUALES EN LA CUENCA.

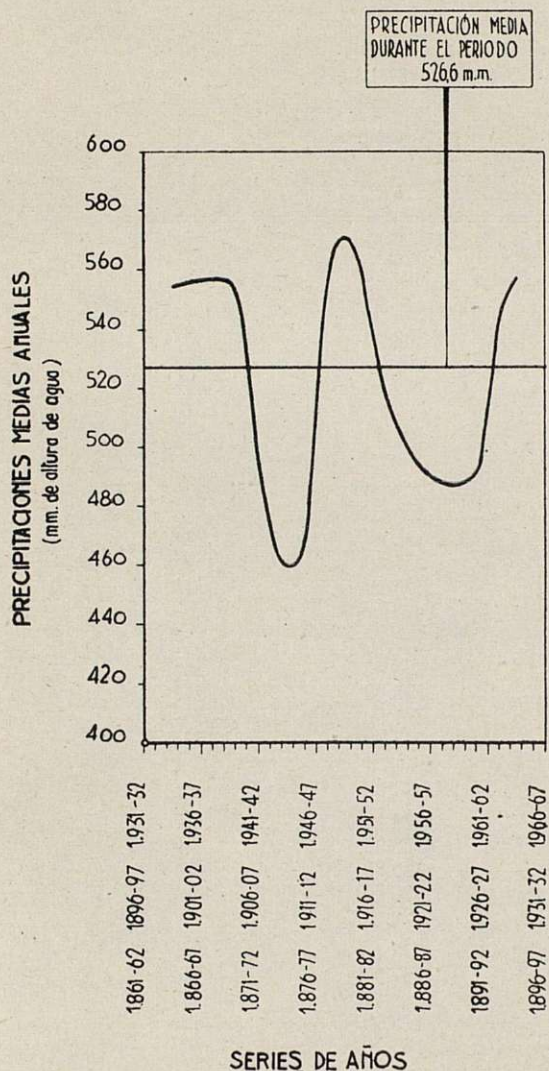


Fig. 8

## CUADRO V

### CUENCA DEL DUERO

#### Aportaciones en Villachica (Zamora)

A ñ o	Aportación (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
1920—21	2.822
1921—22	3.219
1922—23	3.588
1923—24	5.450
1924—25	2.994
1925—26	6.164
1926—27	5.648
1927—28	7.116
1928—29	3.498
1929—30	7.637
1930—31	4.459
1931—32	2.954
1932—33	5.612
1933—34	4.799
1934—35	4.538
1935—36	11.465
1936—37	5.516
1937—38	3.733
1938—39	4.228
1939—40	5.552
1940—41	10.080
1941—42	3.520
1942—43	3.967
1943—44	2.349
1944—45	1.787
1945—46	3.593
1946—47	5.925
1947—48	4.533
1948—49	1.347

NOTA.—Los años hidrológicos son del 1.º de octubre al 1.º de octubre.



# CUADRO VI

## CUENCA DEL DUERO

Precipitaciones medias anuales en mm.

Notaciones . . . . .  $\left\{ \begin{array}{l} h_1 \text{ precipitación media anual en SORIA.} \\ h_2 \quad \quad \quad \gg \quad \quad \quad \gg \quad \quad \quad \text{en BURGOS.} \\ h_3 \quad \quad \quad \gg \quad \quad \quad \gg \quad \quad \quad \text{en VALLADOLID.} \\ h \quad \quad \quad \gg \quad \quad \quad \gg \quad \quad \quad \text{en la cuenca.} \\ h = 0,18 h_1 + 0,35 h_2 + 0,65 h_3. \end{array} \right.$

A ñ o	0,08 $h_1$	0,35 $h_2$	0,65 $h_3$	$h$
1920—21	86,50	168,70	298,90	555
1921—22	93,60	151,00	168,70	413
1922—23	107,10	168,20	169,60	445
1923—24	93,90	144,30	272,11	510
1924—25	73,80	148,20	306,80	529
1925—26	93,90	184,60	297,80	576
1926—27	98,40	196,00	320,10	615
1927—28	114,60	234,70	386,40	736
1928—29	68,30	198,90	257,80	525
1929—30	119,10	255,10	335,10	710
1930—31	82,80	181,10	247,10	511
1931—32	100,20	208,50	256,40	566
1932—33	96,20	222,40	293,40	612
1933—34	96,30	171,10	271,70	539
1934—35	97,70	162,50	243,90	505
1935—36	150,60	288,33	526,90	966
1936—37	95,10	211,70	328,10	635
1937—38	94,90	137,90	278,30	510
1938—39	92,30	189,00	320,80	601
1939—40	105,90	232,20	326,00	665
1940—41	162,70	269,50	378,10	810
1941—42	85,60	171,40	257,50	515
1942—43	106,10	139,90	286,10	532
1943—44	77,70	169,30	178,90	426
1944—45	57,60	113,10	135,70	307
1945—46	110,90	147,80	250,80	510
1946—47	138,10	197,10	314,90	651
1947—48	110,90	159,20	195,00	466
1948—49	99,20	163,20	192,10	455



# CUADRO VII

## CUENCA DEL DUERO EN VILLACHICA (ZAMORA)

Correlación entre aportaciones en Villachica y lluvias medias en la cuenca

V (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	V <sub>m</sub>	$x_1 = V - V_m$	$x_1^2$	h (mm)	h <sub>m</sub>	$x_2 = h - h_m$	$x_2^2$	$x_1 x_2$
2.822	4.762	- 1.940	+ 3.763.600	555	565	- 10	+ 100	+ 10.400
3.219	4.762	- 1.543	+ 2.380.849	413	565	- 150	+ 23.104	+ 234.536
3.588	4.762	- 1.174	+ 1.378.276	445	565	- 120	+ 14.400	+ 140.880
5.450	4.762	+ 688	+ 473.344	510	565	- 55	+ 3.025	- 37.840
2.994	4.762	- 1.768	+ 3.125.824	529	565	- 36	+ 1.296	+ 63.648
6.164	4.762	+ 1.402	+ 1.965.604	576	565	+ 11	+ 121	+ 15.422
5.648	4.762	+ 886	+ 784.996	615	565	+ 50	+ 2.500	+ 44.300
7.116	4.762	+ 2.354	+ 5.541.316	736	565	+ 171	+ 29.241	+ 402.534
3.498	4.762	- 1.264	+ 1.597.696	525	565	- 40	+ 1.600	+ 50.560
7.637	4.762	+ 2.875	+ 8.265.625	710	565	+ 145	+ 21.025	+ 416.875
4.459	4.762	- 303	+ 91.809	511	565	- 54	+ 5.916	+ 16.362
2.954	4.762	- 1.808	+ 3.268.864	566	565	+ 1	+ 1	- 1.808
5.612	4.762	+ 850	+ 722.500	612	565	+ 47	+ 2.209	+ 39.950
4.799	4.762	+ 37	+ 1.369	539	565	- 26	+ 676	- 962
4.538	4.762	- 224	+ 50.176	505	565	- 60	+ 3.600	+ 13.440
11.465	4.762	+ 6.703	+ 44.930.209	966	565	+ 401	+ 160.801	+ 2.687.903
5.516	4.762	+ 754	+ 568.516	635	565	+ 70	+ 4.900	+ 52.780
3.733	4.762	- 1.029	+ 1.058.841	510	565	- 55	+ 3.025	+ 56.595
4.298	4.762	- 534	+ 285.156	601	565	+ 36	+ 1.296	- 19.224
5.552	4.762	+ 790	+ 624.100	665	565	+ 100	+ 10.000	+ 79.000
10.080	4.762	+ 5.318	+ 28.281.124	810	565	+ 245	+ 60.025	+ 1.302.910
3.520	4.762	- 1.242	+ 1.542.564	515	565	- 50	+ 2.500	+ 62.100
3.967	4.762	- 795	+ 632.025	532	565	- 33	+ 1.089	+ 26.235
2.349	4.762	- 2.413	+ 5.822.569	426	565	- 139	+ 19.321	+ 335.407
1.787	4.762	- 2.975	+ 8.850.625	307	565	- 258	+ 66.564	+ 767.550
3.593	4.762	- 1.169	+ 1.366.561	510	565	- 55	+ 3.025	+ 64.295
5.95	4.762	+ 1.163	+ 1.352.569	651	565	+ 86	+ 7.396	+ 100.018
4.533	4.762	- 229	+ 52.441	466	565	- 99	+ 9.801	+ 22.671
1.347	4.762	- 3.415	+ 11.662.225	455	565	- 110	+ 12.100	+ 375.650
			$\Sigma x_1^2 = + 140.441.373$			$\Sigma x_2^2 = + 467.657$	$\Sigma x_1 x_2 = + 7.331.187$	



Asimismo, pudiera preverse para un futuro de los próximos quince años nuevo período seco.

*Correlación entre las aportaciones del Duero en Villachica y las precipitaciones medias en la cuenca.*— Solamente nos resta para hacer extensivas las consecuencias anteriores sobre las lluvias en la cuenca del Duero, a las aportaciones del mismo, investigar si existe correlación entre los valores tomados como precipitaciones medias  $h$  deducidos de la relación

$$h = 0,18 h_1 + 0,35 h_2 + 0,65 h_3$$

y las citadas aportaciones.

En el cuadro V aparece la serie de aportaciones del Duero en Villachica correspondiente a los treinta años, comprendidos entre el 1920 y 1949; asimismo, en el cuadro VI se indica el cálculo de las aportaciones medias anuales correspondientes a los mismos años.

Con las dos series de valores, aportaciones y lluvias medias, establecemos una correlación sistemática, cuya determinación se indica en el cuadro VII, donde aparecen los *colectivos*  $V$  (aportaciones),  $h$  (precipitaciones), las desviaciones, sus cuadros y los productos dobles de las mismas. Del citado cuadro llegamos a las conclusiones siguientes:

#### Desviaciones típicas

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{\sum x_1^2}{n}} = 2.200,60$$

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{\sum x_2^2}{n}} = 126,90$$

#### Factor de correlación

$$r = \frac{\sum x_1 \cdot x_2}{n \cdot \delta_1 \cdot \delta_2} = \frac{7.331.187}{29 \times 2.200,6 \times 126,9} = 0,905$$

#### Error según Pearson

$$f = \pm \frac{0,67449 (1 - r^2)}{\sqrt{n}} = 0,022$$

El error obtenido, al ser menor que el sexto del factor de correlación, nos indica existe una franca correlación y, en consecuencia, una relación estocástica aceptable entre las lluvias y las aportaciones en la citada cuenca del Duero.

#### Ecuación de regresión.

Sabemos *a priori* que puede existir una relación lineal entre las aportaciones de una cuenca y las precipitaciones en la misma, aun cuando también se hayan determinado otras clases de funciones, tales como las parabólicas de Coutagne. Por esta razón, y dada su mayor simplicidad, establecemos una ecuación de regresión rectilínea de la forma

$$x_1 = b x_2$$

en la que

$$b = r \frac{\delta_1}{\delta_2} = 0,905 \times \frac{2.200,6}{126,9} = 15,693$$

Consecuencia de lo que antecede, la correlación entre las precipitaciones medias sobre la cuenca del Duero (deducidas según el criterio arriba indicado que aparece en el cuadro VI) y las aportaciones de dicho río en Villachica, resulta ser

$$V = 15,7 h - 4.579,5$$

Acaba, pues, de comprobarse el alto factor de correlación existente entre las aportaciones del Duero y las precipitaciones medias de la cuenca. En consecuencia, los resultados a que hemos llegado sobre la periodicidad de las lluvias se hacen extensivos a las aportaciones y caudales de dicha cuenca.

#### CONCLUSIONES

De cuanto antecede, y para terminar, llegamos a las conclusiones siguientes:

1.<sup>a</sup> La irregularidad excepcionalmente grande de nuestros ríos y su carácter torrencial hacen inadecuada la utilización del *año medio* para calcular nuestras disponibilidades hidroeléctricas.

Los coeficientes de irregularidad obtenidos para el río Duero en Villachica, el río Esla en Bretó y el Ebro en Cillaperlata, con los valores respectivos de 7,58, 6,94 y 4,23 son suficientemente elocuentes si se comparan con los valores de 1,5 a 2 correspondientes a los principales ríos del centro de Europa.

2.<sup>a</sup> Si para subsanar dicha irregularidad quisiéramos emplear embalses hiperanuales, las características geológicas de nuestro suelo, las necesidades



agronómicas del país, y fundamentalmente las excepcionales capacidades que precisarían aquéllos, restringen notablemente su establecimiento.

Baste como ejemplo los siguientes resultados que se justifican en el estudio:

- a) La regulación hiperanual de  $166 \text{ m}^3/\text{s.}$ , módulo medio de la serie de treinta y cuatro años correspondientes al período 1916-1949 en el río Esla (Bretó), precisaría un embalse de *11.800 millones de  $\text{m}^3$* . Por otra parte, dicho módulo tendría una probabilidad de producirse en el porvenir, de 0,47.
  - b) Para regular hiperanualmente en el Duero (Villachica) el módulo de  $150 \text{ m}^3/\text{s.}$ , medio de la serie 1920-1949, se precisaría un embalse de *16.500 de  $\text{m}^3$  de capacidad*. Además, dicho módulo tendría una probabilidad de aparecer en el futuro, de 0,40.
  - c) Asimismo, la regulación hiperanual en el Ebro (Cillaperlata) de  $65 \text{ m}^3/\text{s.}$ , módulo medio de la serie de treinta y seis años, 1914-1949, sería preciso un embalse de *5.500 millones de  $\text{m}^3$* .
- 3.<sup>a</sup> Aun cuando no se admitan como una realidad incontrovertible los ciclos climáticos de Brückner, la periodicidad obtenida (de 35 años) para las precipitaciones, y, en consecuencia, aportaciones en la cuenca del Duero en Villachica, com-

prueban que en el período 1920-1940 (al que corresponden la mayoría de los aforos existentes que han servido de base a los estudios tantas veces citados de estimación de las posibilidades hidroeléctricas nacionales) abundaron las aguas altas y, en consecuencia, cuantas estimaciones se hayan efectuado a base de aforos de dicho período lo son por exceso.

- 4.<sup>a</sup> La observación de la misma curva anterior, en la que aparece la periodicidad de treinta y cinco años, obtenida para las precipitaciones y aportaciones en la cuenca del Duero, hace pensar en un nuevo período seco para un futuro de los próximos quince años. Y aun cuando los resultados a que se llega en el presente estudio no se fundan en principios de rigor matemático, deben hacer pensar a quienes puedan arriesgar la riqueza pública y el capital privado, en la necesidad de impulsar y dar mayor importancia a los estudios hidrológicos, con el fin de poder estimar acertadamente las posibilidades hidroeléctricas reales de nuestra Patria.

Las conclusiones que preceden marcan, según nuestro criterio, el plan que se debe seguir para, objetivamente, sin pesimismo demoleedores, mas saliendo al paso de exagerados optimismos, llegar a resultados eficaces para el mejor servicio y grandeza de nuestra Patria.

Bilbao, mayo de 1950.

---

---

*El Sr. Presidente cede la palabra a D. Salvador Filella Bragós, que da lectura a la siguiente comunicación:*







## N.º 29. - Las concesiones hidroeléctricas en la industrialización de España

Autor: D. SALVADOR FILELLA BRAGÓS

Ingeniero Industrial

### *Preliminares.*

Entendiendo por concesiones hidroeléctricas las concesiones administrativas de aprovechamientos de aguas públicas con destino a producción de energía eléctrica, exponemos en el presente estudio especial aspecto de las mismas, íntimamente relacionado con el eficaz desarrollo de la industrialización de España.

Como es de capital importancia en la industrialización de un país la disponibilidad de energía, en especial de energía eléctrica, todo lo que sea facilitar su obtención ha de redundar, pues, en beneficio de aquéllos.

La riqueza en aprovechamientos hidroeléctricos con proyectos aprobados por la Administración, que en España por doquier se ofrecen, puede, por tanto, racionalmente utilizada y distribuida su producción en adecuada forma, contribuir en alto grado al fomento de su industrialización.

Y aunque las actividades agrícolas han de ser siempre la base más firme de nuestro bienestar y riqueza, su ponderación con los industriales, en la forma que corresponde a un país moderno de nuestras caracte-

rísticas, puede requerir, sin embargo, en determinados aspectos una supeditación de las mismas a la preferente consideración de las de tipo industrial.

Uno de esos aspectos es el que vamos a estudiar, y como consecuencia de ella, deducir, a nuestro juicio, la justa solución que al final concretamos.

### EL ARTÍCULO 160 DE LA LEY DE AGUAS

El Artículo 160 de la vigente Ley de Aguas de 13 de junio de 1879, dice a la letra lo siguiente:

«Art. 160. En la concesión de aprovechamientos especiales de aguas públicas se observará el siguiente orden de preferencia:

- 1.º Abastecimiento de poblaciones.
- 2.º Abastecimiento de ferrocarriles.
- 3.º Riegos.
- 4.º Canales de navegación.
- 5.º Molinos y otras fábricas, barcas de paso y puentes flotantes.
- 6.º Estanques para viveros o criaderos de peces.

Dentro de cada clase serán preferidas las empresas de mayor importancia y utilidad, y,



en igualdad de circunstancias, las que antes hubiesen socilitado el aprovechamiento.

En todo caso, se respetarán preferentemente los aprovechamientos comunes expresados en las secciones primera, segunda y tercera del capítulo anterior.»

Es decir, que se establece, de modo absoluto, el preferente otorgamiento de concesiones de aprovechamientos de aguas con destinos a riegos, al dedicado a molinos y otras fábricas.

Sin dejar de reconocer que en muchos casos sea esto lógico y conveniente a la economía nacional, sin embargo, cabe argüir que no puede afirmarse, en términos generales, cuando de aprovechamientos hidroeléctricos se trata, y, por lo mismo, que sería conveniente la revisión del Artículo 160 de la Ley de Aguas, que, naturalmente, no podía prever la transcendental influencia que con el tiempo habían de ejercer esos aprovechamientos en múltiples aspectos de la vida del país.

#### CONCESIONES HIDRÁULICAS CON DESTINO A RIEGOS

En aplicación del mencionado Artículo 160, las concesiones hidroeléctricas se otorgan siempre con la expresa condición de respetar los regadíos existentes en los tramos del río afectados por las mismas, mediante adecuados dispositivos en la presa o en los canales, para el vertido de los caudales correspondientes, ya sea durante todo el año o, por lo menos, durante cuatro meses en verano (corriente desde mediados de mayo a mediados de septiembre). Y ello, aunque el aprovechamiento hidroeléctrico se haya declarado de utilidad pública a los efectos de la expropiación forzosa. Y con la particularidad de que el caudal concedido para un aprovechamiento hidroeléctrico, puede ser objeto de expropiación, mediante indemnización, por otro con destino a riegos que sea incompatible con el primero, y cuya concesión haya sido otorgada posteriormente.

Sin embargo, no hemos de perder de vista que, aunque la mayor importancia y utilidad de que trata el Artículo 160, se refiere literalmente a las empresas o aprovechamientos de aguas dentro de cada una de las seis clases que indica, es evidente que el espíritu que inspiró al legislador al dictarlo, fué el del criterio

en su acepción más amplia de la mayor importancia y utilidad, esto es, desde el punto de vista del interés público, el cual no radica siempre, por cierto, en el preferente otorgamiento de una concesión con destino a riegos, al de una concesión hidroeléctrica. En otras palabras, que pueden darse casos en los que sea preferible la utilización de un determinado caudal de agua para la producción de energía eléctrica, que consumirlo en el riego de los terrenos de determinada zona con cultivo de secano, o sin cultivo ninguno.

#### BENEFICIO NACIONAL DE LOS RIEGOS Y DE APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS

La dotación que requiere el riego de una hectárea de terreno, aunque variable según las condiciones del paraje y la clase de cultivo, es, en la mayor parte de los casos, suficiente con un litro por hectárea y segundo. Y, aunque en ciertos cultivos, como el arroz, la dotación es mayor, en cambio en otros bastan dotaciones menores. Si, además, prescindimos de considerar la dotación continua durante todo el año del caudal concedido y nos limitamos, para fijar las ideas, en una hipotética dotación durante los cuatro indicados meses, a razón de tres cuartos de litro por hectárea y segundo, podremos adoptar como prudente promedio para el riego de una hectárea de terreno, el consumo de unos ocho mil metros cúbicos de agua al año.

Y, aunque, en principio, dentro de criterio de máxima utilidad social, debieran preferirse en la parte superior de las cuencas los aprovechamientos hidroeléctricos a los riegos, y viceversa en la parte inferior, veamos de precisar con algún concreto detalle cuál sea el alcance de la utilidad de unos y otros, que nos permita obtener una solución que resuelva definitivamente el problema.

Si bien, para ello resulta de gran interés, y muy distinto, ciertamente, en sus resultados el estudio de cada cuenca, para dar idea global de lo que representa, procederemos a una prudente estimación, en líneas generales, que nos demuestre la importancia y utilidad media de lo que nos proponemos.

Cotejemos, en efecto, el beneficio nacional que esos 8.000 m.<sup>3</sup> de agua anuales produce cuando se consumen para el riego, con el que resultaría de su utilización en sucesivos aprovechamientos hidroeléctricos



escalonados en los cursos de agua desde la cabecera de sus cuencas hacia el mar.

Un metro cúbico de agua puede producir, teóricamente, por metro de salto utilizado, 0,00272 kilovatios-hora. Los 8.000 m.<sup>3</sup> podrían producir, pues, 21,76 kilovatios-hora.

Aplíquese ese resultado a los desniveles y volúmenes fluviales aprovechables de una cuenca, y se verá, en seguida, el gran número de kilovatios-hora al año que pueden dejar de producirse por el consumo de agua en el riego de una hectárea de terreno, y cuyo valor es, evidente, muy superior al beneficio producido por dicha hectárea, incluso en las más favorables condiciones de cultivo del mejor terreno de regadío.

### CONSIDERACIONES SOBRE LA RACIONAL SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

De todos modos, se podría acertadamente observar que, aplicando el criterio expuesto, pudiera, tal vez, resultar que en algunas cuencas apenas quedase dotación para el riego de escasísima zona en su parte inferior, en perjuicio de la producción agrícola y, por consiguiente, de la economía nacional.

De aquí, pues, que, en beneficio del agro español, pero sin recurrir tampoco a la inconveniente producción de energía hidroeléctrica, se haga cada día más necesario encontrar la racional solución del problema.

No cabe, desde luego, resolver el conflicto, supliendo mediante energía termo-eléctrica la que pudiese producirse en aprovechamientos hidroeléctricos mediante los caudales consumidos en el riego. Aparte la debilitación que ello representaría de las escasas existencias nacionales de carbón o carburantes (necesarios, además, para otros usos), cada kilovatio-hora producido exigiría, en los casos más favorables, el consumo de, por lo menos, 700 gramos de carbón, o de 250 de aceites pesados, o de un litro de gasolina, de valor superior al de la producción del kilovatio-hora hidroeléctrico.

Todo ello se ha debatido mucho en Congresos de riegos, y se han aportado sobre el particular interesantes razonamientos en publicaciones diversas, y se ha llegado siempre invariablemente a la conclusión de que procede la revisión de la Ley de Aguas y consiguiente modificación del Artículo 160. Sin em-

bargo, ninguna concreta propuesta, que sepamos, se ha formulado hasta la fecha al respecto.

Unicamente por R. O. de 21 de julio de 1921 (*Gaceta de Madrid*, del 24) se dispuso la publicación en la misma y se abrió información pública, de un proyecto de reforma de dicha ley en lo que se relaciona principalmente con la concesión de aprovechamientos para producción de fuerza, el cual no llegó a cristalizar en la correspondiente ley.

La base 3.<sup>a</sup> de ese proyecto es como sigue:

#### *Base 3.<sup>a</sup> Orden de preferencia en los aprovechamientos.*

En caso de incompatibilidad, el orden de preferencia para otorgar las concesiones y aprovechamientos será el siguiente:

- 1.<sup>o</sup> Abastecimiento de poblaciones, incluso en esta denominación las colonias agrícolas o industriales, los establecimientos y servicios públicos y los de Beneficencia o Sanidad aislada.
- 2.<sup>o</sup> Abastecimiento de ferrocarriles, sea por medio de locomotoras de vapor, o de producción de energía eléctrica destinada a la tracción.
- 3.<sup>o</sup> Aprovechamiento para riegos.
- 4.<sup>o</sup> Aprovechamientos hidroeléctricos de potencia efectiva superior a mil caballos, combinados con la construcción de pantanos, incluidos en el plan del Estado con destino a riegos y que tengan su proyecto aprobado.
- 5.<sup>o</sup> Canales de navegación.
- 6.<sup>o</sup> Aprovechamientos para fuerza motriz, transformable o no, en energía eléctrica.
- 7.<sup>o</sup> Barcas de paso y puentes flotantes.
- 8.<sup>o</sup> Estanques para viveros o criaderos de peces.

### PROPUESTA DE SOLUCIÓN DEFINITIVA

Como se ve, ya en aquel tiempo, en ese proyecto, se tuvo a los aprovechamientos hidroeléctricos la consideración a que eran acreedores, la cual ha ido aun en aumento desde entonces. De aquí que, al estimar, en líneas generales, lo que en la base 3.<sup>a</sup> se propone, y habida cuenta de los razonamientos expuestos, podría, de momento, modificarse el Art. 160 de la Ley de Aguas (dejando para más adelante la cuidadosa revisión de la misma) adaptándolo definitiva-



mente a las necesidades que los tiempos presentes requieren, en la forma siguiente:

Art. 160. En la concesión de aprovechamientos especiales de aguas públicas, se observará el siguiente orden de preferencia:

- 1.º Abastecimiento de poblaciones, incluyendo en esta denominación las colonias agrícolas o industriales, los establecimientos y servicios públicos y los de Beneficencia o Sanidad aisladamente.
- 2.º Abastecimiento de ferrocarriles, sea por medio de locomotoras de vapor, o de producción de energía eléctrica destinada a tracción.
- 3.º Aprovechamientos para riegos, o hidroeléctricos de potencia efectiva superior a mil caballos, según orden de preferencia de unos u otros, determinable con arreglo a las normas que el Ministerio de Obras Públicas dicte al respecto.
- 4.º Canales de navegación.
- 5.º Aprovechamientos para fuerza motriz, transformable o no, en energía eléctrica.
- 6.º Barcas de paso y puentes flotantes.
- 7.º Estanques para viveros o criaderos de peces.

Dentro de cada clase serán preferidos los aprovechamientos de más importancia y utilidad, y, en igualdad de circunstancias, los que antes se hubiesen solicitado.

En todo caso, se respetarán preferentemente los aprovechamientos comunes expresados en las secciones primera, segunda y tercera del capítulo anterior.

Como complemento de la transcrita solución, indicamos, finalmente, una propuesta de la parte dispositiva del Decreto que habría de dictarse (una vez aprobada la reforma del Artículo 160 de la Ley de Aguas) en cumplimiento de lo que se dispondría en su Apartado 3.º Es la siguiente:

Artículo 1.º En cumplimiento de lo dispuesto en el Apartado 3.º del Artículo 160 de la vigente Ley de Aguas, en el plazo de un año, a contar de la publicación de este Decreto en el *Boletín Oficial del Estado*, se procederá, por las Confederaciones Hidrográficas y los Servicios Hidráulicos

de la Península e insulares, a la determinación de la parte o partes de las cuencas de su jurisdicción, en las que habrían de ser, en lo sucesivo, de preferente otorgamiento a las de aprovechamientos de aguas con destino a riegos las concesiones hidroeléctricas, y recíprocamente.

Art. 2.º El estudio así realizado se pasará a informe de las Secciones Agronómicas y Delegaciones de Industria de las provincias afectadas, y, teniendo éstos en cuenta, elevarán los servicios Hidráulicos a la Dirección General de Obras Hidráulicas propuesta concreta al respecto, dentro de los seis meses siguientes al mencionado plazo.

Art. 3.º Resuelto por este Ministerio para cada una de las jurisdicciones de los servicios hidráulicos lo que sobre la propuesta de éstos proceda, se someterá el estudio de la delimitación de las zonas o partes de las cuencas provisionalmente aprobado, a información pública, el resultado de la cual y previos nuevos informes de las Secciones Agronómicas y Delegaciones de Industria de las provincias afectadas, se elevará con el de aquellos servicios a dicha Dirección General, para la definitiva resolución de este Ministerio.

Art. 4.º De las zonas de cada cuenca que definitivamente queden así delimitadas, se divulgará cuanto sea posible su general conocimiento, a los procedentes efectos.

Art. 5.º El Ministerio de Obras Públicas dictará las disposiciones complementarias a lo establecido en este Decreto.

Al estimar, en consecuencia, que la precedente concreta propuesta, podría ser una solución definitiva de tan importante y delicado problema, nos cumple, en beneficio del interés público, así ofrecerla, como justa apreciación del valor que, en la industrialización de España, habrían de merecer las concesiones hidroeléctricas.

Barcelona, 10 de marzo de 1950.

---

*Interviene a continuación D. Julián Dorao, en relación con el trabajo anterior, y manifiesta que es de gran responsabilidad el tratar de modificar la vigente Ley*



de Aguas de 13 de junio de 1879, a la que denominó el autor del Alcubilla «monumento legislativo», y que ha de considerarse el primer código mundial articulado y completo de su tiempo, y cualquier modificación que se desee de la misma, ha de hacerse con mucho tacto y con las máximas garantías para no producir trastornos graves, y hay que lamentar que los legisladores posteriores no hayan redactado el Reglamento para su aplicación, que tan necesario es para casos de interpretación de dicha Ley administrativa.

El proyecto de reforma de la Ley, que aparece en la «Gaceta» del 24 de junio de 1921, a que hace referencia la propuesta del señor Filella, indica claramente la serie de garantías que en aquellos tiempos se consideraban precisas para una modificación de este tipo, pues lo publicado en la «Gaceta» era el anuncio de información pública, para que concurrieran a ella todas las entidades de solvencia intelectual y económica que pudieran aportar conocimientos sobre el asunto, y entonces se vió que la propuesta que se formulaba no sólo quería modificar la Ley de Aguas, sino también principios fundamentales del Código Civil, lo cual hubiera producido un trastorno extraordinario en la vida la Nación, y por eso, fracasó rotundamente aquella propuesta de reforma.

Desde el punto de vista concreto planteado por el señor Filella, respecto a la preferencia de riegos sobre aprovechamientos hidroeléctricos, nos da nueva demostración de la sabiduría de la Ley, pues es evidente que la función del regadío —que consiste en producir alimentos— es de orden primordial, muy por encima de la producción en kilovatios. No se puede dejar de tener en cuenta, además, el factor que pudiéramos llamar social, que ahora está tan en boga, pues los regadíos tienden a crear riqueza en una zona determinada, que es allí donde pueden desarrollarse, y no en otro lugar; y, en cambio, los kilovatios pueden producirse por otro procedimiento que el hidroeléctrico, y después, transportarse lejos.

No pueden, por tanto, admitirse las comparaciones simplemente económicas entre el valor de riegos y el valor de kilovatios, pues tienen más trascendencia los otros factores locales.

Por todo ello, entendemos que no es motivo suficiente el expuesto por el señor Filella para una labor de la trascendencia que representaría para la Nación el modificar la Ley de Aguas, y que los problemas que en este orden puedan suscitarse se pueden resolver con la actual legislación o, en todo caso, con la publicación del Reglamento de la Ley.

Pide la palabra D. Manuel Sánchez Robles, y se la concede el Sr. Presidente, y aquél dice que la concisión del extracto que figura en el resumen de trabajos presentados al Congreso y la rapidez en la exposición completa del trabajo por su autor, nos impide realizar un estudio a fondo del mismo, pero estimamos conveniente exponer algunas observaciones.

En cuanto al aspecto legal de la cuestión, nada hemos de añadir a lo expuesto por D. Julián Dorao. Al parecer, se trata de establecer una paridad en las concesiones de aprovechamientos hidroeléctricos y para riegos, modificando el Artículo 160 de la Ley de Aguas. En relación con lo expuesto en la Ponencia sobre regadíos pequeños existentes, que pueden perturbar y aun inutilizar el funcionamiento de un nuevo aprovechamiento hidroeléctrico, debemos consignar que ya la causa probable de no estimarse la propuesta de Ley del año 1921, debió ser lo dispuesto



en su Base segunda sobre anulación de la prescripción, por contravenir lo dispuesto en el Código Civil a este respecto.

En segundo lugar, la importancia de los caudales que se hayan de utilizar respetando dichos regadíos suele ser muy pequeña, por cuanto se trata de extensiones aprovechando los ensanchamientos del cauce del río, que por sus características de terreno, en la mayoría de los casos, han originado el establecimiento de población al amparo de sus productos.

En cuanto a los nuevos regadíos que se pretendan, hay que observar que, aun cuando la Ley establece un orden de preferencia, en rigor, es difícil pueda existir dicha competencia, por cuanto los aprovechamientos para riegos quedan definidos por su toma como una sangría en el caudal del río con consumo de agua, en tanto los hidroeléctricos definen un tramo del propio río, en el que se utiliza la energía sin consumo de caudal.

Aun cuando en la Ley no establece más que lo dispuesto en el Artículo 160, hay que observar que Decretos y Ordenes Ministeriales posteriores han resuelto dichas dificultades de tipo interpretativo, y aun la Ley de 7 de julio de 1911, en virtud de las cuales, cuando se trata de establecimiento de nuevos regadíos, casi imposibles en la actualidad si no se aprovechan los beneficios de la regulación de los embalses, es necesaria la inclusión del proyecto en el Plan de Obras hidráulicas, y ello lleva aneja la tramitación reglamentaria con intervención de los altos organismos del Estado.

En consecuencia, vemos que, a lo largo de dicha tramitación, puede hacerse patente el beneficio superior hidroeléctrico y obtenerse así las concesiones sin ulterior modificación del artículo que se debate.

Las observaciones referentes a abusos de consumo de caudales y demás, están recogidas en la vigente legislación, por lo que estimamos que no es necesaria su modificación.

En resumen, somos de la opinión de que procede felicitar al Sr. Filella por el estudio presentado y estimarlo como confirmación del criterio sustentado por el Ministerio de Obras Públicas en las concesiones otorgadas y en tramitación.

Interviene el Sr. García Vinuesa, y manifiesta en primer lugar, que cree, como ha dicho el Sr. Dorao, que una modificación de la Ley de Aguas requiere estudio detenidísimo, tratándose como se ha indicado de un monumento legislativo; y en cuanto a las indicaciones hechas por el segundo de los oradores que han intervenido, de que los aprovechamientos de regadío estaban perfectamente modulados, debe hacer constar que está muy lejos de la realidad, puesto que todos, o una gran parte de los que utilizan aprovechamientos hidroeléctricos, observamos que son muchos los regadíos abusivos y clandestinos que impiden la marcha normal de los aprovechamientos hidroeléctricos, todo lo cual exige intervención eficaz de los organismos oficiales para evitar la detracción de volúmenes de aguas que impiden la marcha normal de la industria. Son, pues, las autoridades las que han de velar para evitar tales abusos.

Don Manuel María Serret hace uso de la palabra y dice: Contestando a la intervención del Sr. García Vinuesa, y para tranquilizar a todos los congresistas, puedo manifestar que dentro de breves días recibirán los Servicios Hidráulicos del Ministerio de Obras Públicas, una orden de precipitar todos los aprovechamientos abusivos tanto de riegos como de energía eléctrica.



En relación con la preferencia que manifiesta la Ley de Aguas en su Artículo 160, acerca de los regadíos, es lógica, puesto que se trata de un problema eminentemente humano y lo primero es vivir. ¿Qué hubiera pasado si en el aislamiento que hemos sufrido en los años de la guerra mundial, no hubiéramos podido obtener productos del campo?

Por naturaleza, las agrupaciones industriales se defienden con una organización y una Gerencia, que hacen posible que lleguen sus voces a los Poderes Públicos. Las agrupaciones agrícolas, por su misma naturaleza, son difíciles de reunir y de darles consistencia para que puedan de manera eficaz acercarse a los Poderes Públicos a fin de que en momentos determinados sean defendidos sus derechos. Es por esto por lo que todos los Estados se erigen en defensores de las clases agrícolas. Los aprovechamientos actuales para regadíos, conducidos de manera suave, para que se intensifiquen los trabajos agrícolas, no de forma artesana, sino para producir la mayor cantidad posible con el mínimo número de hombres, precisa que no se modifique el Artículo 160 de la Ley, ya que, cuando es preciso, el Estado da la preferencia a aprovechamientos hidroeléctricos.

Interviene el Sr. Filella para contestar, e insiste en que aunque no es necesaria la reforma en su totalidad de la Ley de Aguas, sí que requiere la perentoriedad de la regulación de suministro necesario de energía eléctrica, para atender a las necesidades de la economía nacional, la modificación del Artículo 160, teniendo alguna mayor consideración a los aprovechamientos de agua con destino a la producción de dicha energía, ya que la monumentalidad de una obra o Ley, como es la de aguas, no impide, que sin perjuicio de su estilo o espíritu, se le añada cuanto pueda mejor contribuir al fin para que fuera creada o dictada. En ese sentido podría, pues, suavizarse, entre otros aspectos, la cuestión del régimen de caudales a que vienen supeditados los saltos de pie de presa de los pantanos, con destino a riegos, sin perjuicio de éstos.

El Sr. Rubio interviene para manifestar que, con arreglo a su experiencia, la propuesta de modificación de la Ley de Aguas, hecha por el Sr. Filella, no le parece justificada, aunque reconoce que en teoría no puede sostenerse en todos los casos que ha de ser preferente cualquiera concesión de agua para riego a una concesión de agua para usos industriales, cuyo interés para la economía nacional sea mayor que la de aquélla.

Después del consumo de turnos, el Sr. Sánchez Robles hace uso de la palabra para aclarar lo expuesto en dos alusiones posteriores a su intervención: "En la discusión, al parecer, se habla del Artículo 160 de la Ley de Aguas vigente, en relación con concesiones ya otorgadas por riegos con derecho de prescripción, y queremos subrayar con su lectura que en el Artículo 160 se dice: "Dentro de esta clase serán preferidas las empresas de mayor importancia y utilidad, y en igualdad de circunstancias, las que antes hubieran solicitado el aprovechamiento", lo cual hace patente que se trata de nuevas concesiones.

En segundo lugar, creemos que los aprovechamientos abusivos situados en las cabeceras de las cuencas, o el mal uso del agua, no se superan con la modificación de la Ley, sino con el cumplimiento de lo actualmente establecido, tanto en ella como en las disposiciones complementarias.

Después insiste en que, en los casos de nuevos regadíos, sin modificar el referido artículo, es necesaria la tramitación reglamentaria equivalente a la propo-



*ción que expone el Sr. Ponente, teniendo presente que, no sólo intervienen los usuarios hidroeléctricos, sino los propios regantes de aguas abajo, en defensa de los caudales de que disfrutan y a la vista de lo dispuesto en el Artículo 190 de la Ley.*

*Y, por último, reitera la propuesta formulada en la primera intervención en relación con los estudios que se examinan.*

*El Sr. Filella contesta diciendo: Que si no en los términos concretos del trabajo presentado, en algunas forma se incluya entre las conclusiones del Congreso una referente a resolver el problema de la incompatibilidad existente entre el aprovechamiento de agua con destino a riegos y el de producción de energía eléctrica, de forma que no prevalezcan en los casos de competencia, de manera tan absoluta los aprovechamientos de riegos sobre los hidroeléctricos: Primero. Para que pueda tenerse en cuenta en los proyectos nuevos, y segundo, a fin de que en las obras o en los aprovechamientos hidroeléctricos en explotación desaparezca la amenaza de quedar inmovilizada la totalidad o parte de los capitales invertidos.*

*Concedida la palabra al Sr. Martínez Cattaneo, éste, cree que su trabajo, número 20, "Apunte sobre el futuro eléctrico español", que a continuación se reproduce, es muy modesto, y por ello renuncia a su lectura, indicando que le hubiera complacido ver, no obstante, publicado su extracto en el libro de resúmenes editado por el Congreso.*



## N.º 20. - Apunte sobre el futuro eléctrico español

Autor: D. ANTONIO MARTÍNEZ CATTANEO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Creemos que, por lo menos en un 80 % de las producciones básicas de nuestra economía, el déficit de abastecimiento en relación con la demanda es considerable. Sin embargo, muchas de estas faltas no se palpan de modo tan notorio como ocurre con el problema de escasez de energía eléctrica, popular en extremo y solamente superado, a nuestro juicio, desde este punto de vista, por la falta de productos alimenticios, combustibles y viviendas.

Mucho se discute sobre la resolución inmediata de este acuciante problema, y se habla en revistas técnicas y en la Prensa, del inmediato futuro que alcanza a esta importantísima rama de la producción de energía en España. Sin embargo, muy raras veces puede encontrarse alguna alusión a este problema, enfocado desde el punto de vista que alcanza un plazo más dilatado.

Dada la situación de nuestra posible producción carbonera, puede decirse, en líneas generales, que el grueso de nuestra producción eléctrica ha de basarse en las fuentes de origen hidráulico; un examen superficial, de cuyos recursos, comparado con la posible de-

manda nacional, queremos estudiar en estas breves líneas.

Vamos a basarnos, para ello, en los estudios realizados por González Quijano en su *Avance para una evaluación de la energía hidráulica en España*, 1932. Considerando el aprovechamiento integral de todos los ríos españoles, y sin despreciar aquellos tramos de los mismos que son prácticamente inútiles, obtiene González Quijano como máxima potencia teórica, 11.122.980 CV. para el año medio, entre los estudiados.

Actualmente son corrientes utilidades de 2.800 a 3.000 horas/año en las centrales hidroeléctricas, pero no cabe duda que un mejoramiento de nuestra red de interconexión y transporte de energía en la posibilidad de compensación estacionales entre comarcas de distinto régimen, a la par que un mejoramiento de la utilización industrial y doméstica, pueden conducir a factores de utilización más elevados, que llegaremos a estimar en 4.500 horas, ya que esto nos hace colocarnos en situación más pesimista para el objeto que perseguimos con las presentes líneas. Esto supuesto, pode-



mos estimar que el aprovechamiento integral de los ríos españoles puede proporcionarnos una energía anual aproximadamente de  $37.000 \times 10^6$  kw.-h.

No creemos que puede producirse económicamente al año, con centrales térmicas alimentadas por carbón, más de  $3.000 \times 10^6$  kw.-h.

En total, pues, se puede suponer, dentro de la aproximación con que trabajamos, una máxima producción previsible del orden de los  $40.000 \times 10^6$  kw.-h.

Pasemos ahora a analizar el aspecto contrario de la cuestión, es decir, cuál es el crecimiento de la demanda que nos permita estimar aproximadamente el momento en que han de ser puestos en juego todos nuestros recursos eléctricos.

Son muy diversas las estimaciones que se han hecho sobre el porcentaje de crecimiento anual de nuestra demanda eléctrica, y que varían entre el 5 y el 10,5 por 100. Nosotros hemos deducido un porcentaje medio de crecimiento entre 1929 y 1948, que estimamos en el 5 por 100, mientras que el correspondiente al período 1939-1948 llega a ser del 7,2 por 100.

Es mucha aventura extrapolar la aplicación de estos valores de crecimiento en la forma que vamos a hacerlo, pero a ello nos inducen dos cosas: en primer lugar, que el porcentaje aplicado es del mismo orden de magnitud que los actualmente vigentes en diversos países de características industriales más avanzadas que el nuestro, lo que nos permite suponer que en nuestro futuro más lejano no difiriremos mucho de esta cifra, y en segundo lugar, el que su aplicación nos conduce a unos consumos anuales por habitantes perfectamente aceptables.

Falta, para nuestro estudio, poder estimar, a lo largo del tiempo a que nos extendemos, cuál es la previsión de la población de España. Para ello nos hemos basado en la llamada «curva logística» que, según parece, sigue en su crecimiento nuestra población, y cuya ecuación es, según estudios del *Boletín de Estadística*:

$$y = 14.443 + \frac{31.015}{1 + e^{\frac{96.344 - t}{30.085}}} \text{ millones de habitantes;}$$

siendo  $t$  el año, contado a partir de 1860.

Todos los datos obtenidos se recogen en el gráfico adjunto, pudiendo observarse en el mismo que la demanda antes citada de  $40.000 \times 10^6$  kw.-h. será alcanzada, dentro de nuestras previsiones, en el año 1985 (1), en el cual tenemos en este supuesto los siguientes datos complementarios.

Población de España ... ..	35.900.000 habitantes.
Producción o demanda por habitante/año ... ..	1.140 kw.-h.
Factor de utilización ... ..	4.500 horas.
Potencia instalada ... ..	11.100.000 KVA.

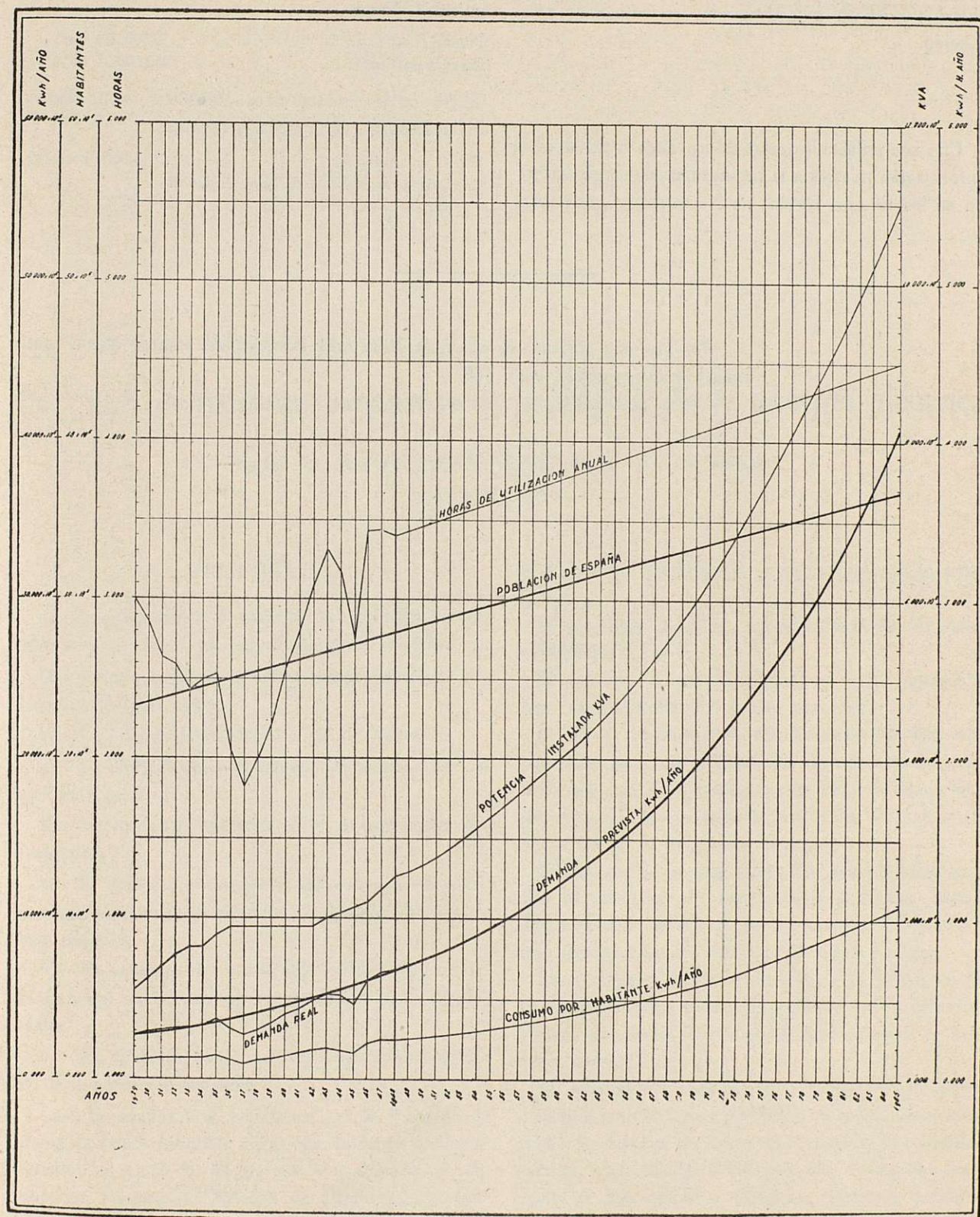
Como resumen de cuanto exponemos y dentro de la falta de aproximación de los datos que han servido de base a este trabajo elemental, queremos poner de manifiesto cómo es preciso realizar ingente esfuerzo por parte de todos aquellos Organismos y Empresas dedicadas a las actividades hidroeléctricas en España, para poder no solamente superar la actual crisis (lo que parece probable inminentemente), sino resolverla a lo largo de los años del inmediato futuro de España, en forma que pueda llegarse al aprovechamiento integral de nuestros ríos en un plazo aproximado de treinta y cinco años, lo que, como puede verse en el gráfico indicado, requiere la puesta en servicio, anualmente, de instalaciones que sean capaces de producir de 350 a  $400 \times 10^6$  kw.-h./año en los próximos años, pero con incremento progresivo que llegará hasta la instalación anual de 550.00 KVA., capaces de producir  $2.000 \times 10^6$  kw.-h./año en los últimos, y al mismo tiempo la terminación, aumento de potencia de las actuales y construcción de las nuevas centrales térmicas precisas para tan mínima reserva como la que hemos supuesto.

No suponemos la existencia de otra posible variable, cual es la de importación o exportación de energía eléctrica, factible mediante adecuadas líneas de transporte internacional.

Si no consideramos la posibilidad de que irrumpan en la vida técnica y práctica de los españoles nuevas formas de energía de fuente diversa a la estudiada, es absolutamente necesario un esfuerzo nacional de gran

(1) Empleando el 7,2 %, se alcanza el año 1973, o sea, dentro de veintitrés años, y si hacemos el cálculo con el 6 % indicado por UNESA, resultará el año 1976, es decir, dentro de veintiséis años, siempre sobre la base de cuatro mil quinientas horas de utilización.







importancia para poder ajustar la posibilidad de producción eléctrica a la demanda creciente de nuestra Nación.

\* \* \*

Una vez redactadas estas notas, llega a nosotros la información relativa a la producción de energía eléctrica en los Estados Unidos de Norteamérica, el pasado

año 1948, y cuyos datos pueden resumirse en las siguientes cifras:

Potencia instalada ... ..	70.000.000 kw.
Energía producida ... ..	350.000 × 10 <sup>6</sup> kw.-h.

de los cuales corresponden 100.000 a la producción hidroeléctrica y 250.000 a la térmica.

Factor de utilización ... ..	5.000 horas/año.
Crecimiento de la demanda sobre el año anterior ... ..	10 %.

---

---

*Por no estar presente su autor, la Mesa hace mención del trabajo que a continuación se reproduce, núm. 148.*



## N.º 148.-Soluciones españolas al problema de la energía eléctrica

Autor: D. ANGEL MASFERRER PLA DE LA SALA

Ingeniero Industrial

### PREAMBULO

La situación eléctrica española ha revestido y reviste aún, en menor grado, caracteres de gravedad.

El consumo aumenta constantemente debido a circunstancias tales como:

- 1.º La creciente industrialización de España.
- 2.º La electrificación constante del campo y de los medios rurales.
- 3.º La tendencia marcada a la electrificación del transporte.
- 4.º El aumento considerable del consumo doméstico como consecuencia del deseo continuado de nuevas comodidades.
- 5.º El aumento del alumbrado público y, en particular, del alumbrado en los establecimientos comerciales.
- 6.º El aumento debido al crecimiento demográfico de la población española.

Los aficionados a la estadística y a la recogida de datos, podemos observar cómo este aumento oscila alrededor de un 8 % de un año con relación al año anterior (véanse los Estados de Producción y Distribución de Energía Eléctrica, que publica anualmen-

te el Consejo de Industria, y se comprobará lo antes dicho).

El consumo anual es, aproximadamente, de unos 6.500.000.000 kw.-h.

El aumento de consumo anual de 8 % representa, pues, unos 520.000.000 kw.-h. por año.

Existe un problema de restricciones que han sido valoradas en unos 715.000.000 kw.-h. anuales, número que considero excesivamente bajo, ya que a simple vista se observa que la restricción es muy superior a un 11 % del consumo actual.

El aumento de consumo probable, si no hubiera existido el problema de restricciones eléctricas, habría sido alrededor del 12 % del consumo anual medio, o sea, alrededor de los 780.000.000 kw.-h. anuales.

Si suponemos un factor de utilización de las centrales de 2.500 horas de funcionamiento anual, debería instalarse anualmente para cubrir este aumento de consumo unos 312. KVA.

Si, además del aumento de consumo anual, queremos subsanar el actual problema de restricciones eléctricas en espacio de cinco años, deberíamos instalar, además, unos 62.500 KVA. por año, o sea que entre centrales hidráulicas y térmicas, debieran instalarse unos 374.500 KVA. por año.



El volumen medio de instalaciones en estos cinco últimos años no ha rebasado la cifra de 120.000 K. V. A. Existe, pues, un déficit de 254.500 K. V. A. anuales.

Las restricciones eléctricas constituirán, pues, un problema a perpetuidad, a no ser que cada industrial, dentro de su fábrica o dentro de su industria, adopte el criterio de independizarse de las empresas de servicio público, o bien el Estado, en vista de este gran problema nacional y de los grandes perjuicios que ocasiona, se decida a afrontarlo.

Tratemos, pues, de exponer los métodos que creamos podrían ser empleados para resolver el problema eléctrico, teniendo en cuenta los distintos puntos de vista que el problema presenta, y que son:

1.º Aspecto legal de la cuestión y consideración de problema de carácter patrio cuya resolución es de ABSOLUTA NECESIDAD NACIONAL.

2.º Punto de vista económico, de rentabilidad y de entidades o personas que deben afrontar la solución del problema.

3.º Aspecto técnico de la cuestión y técnicos que pueden y deben resolverlo.

4.º Aspecto constructivo y práctico, concesiones útiles y concesiones que precisan abolirse.

#### ASPECTO LEGAL DE LA CUESTIÓN.—ANOMALÍAS EXISTENTES. — FORMA DE RESOLVERLAS.—LA RESOLUCIÓN DE LA CUESTIÓN ES UN PROBLEMA DE ABSOLUTA NECESIDAD NACIONAL

El problema eléctrico español es de solución inaplazable. Los daños ocasionados a la economía del país por cada año que se tarda en resolverlo, son tan considerables que todo sacrificio es poco y justifica las medidas precisas para ello.

Pero con legislación anticuada no puede lograrse resolver problemas modernos. Con la antigua Ley de Aguas, con el Reglamento de Concesiones Hidráulicas de 7 de enero de 1927, con el Régimen de Confederaciones Hidrográficas, con la antigua Ley de Expropiación Forzosa, no puede pretenderse hacer rápidamente la labor necesaria. Es preciso examinar la legislación actual y observar las varias anomalías que presenta y procurar subsanarlas.

Anotemos algunas de estas anomalías:

Al Ministerio de Industria y Comercio se le hace responsable de la prestación del servicio eléctrico y se le encomienda la vigilancia de la regularidad y constancia del suministro, pero no se le asigna presupuesto alguno para la ejecución de obras que tiendan a mejorar las condiciones del suministro.

Por otra parte, al Ministerio de Obras Públicas se le encarga de la vigilancia de los ríos, del régimen de concesiones de aprovechamientos hidráulicos, de la ejecución de las obras hidráulicas del Estado español, sin que exista la debida conexión entre ambos departamentos.

Una gran presa hidráulica puede ser proyectada dentro de una Confederación Hidrográfica o de una provincia española cualquiera sin consulta alguna ni previo informe de la Dirección General de Industria, ni Dirección General de Agricultura sobre las necesidades eléctricas o de riego de la zona afectada.

De aquí se han derivado graves inconvenientes. Debido a la falta de datos sobre el planteamiento del problema eléctrico los proyectistas han tenido tendencia marcada en preocuparse sólo del problema de riego y no se ha considerado suficientemente la resolución del problema eléctrico en las obras de los grandes pantanos.

En segundo lugar, faltos del informe de las Direcciones Generales de Industria y de Agricultura, sobre las necesidades eléctricas y agrícolas de la zona afectada por el embalse, no habían resuelto satisfactoriamente ni el problema agrícola ni el eléctrico.

Es la hora de la colaboración de las grandes ramas de la Ingeniería española en la obras del Estado español.

En nada han beneficiado a la economía española los informes demasiado meticulosos y muchas veces desfavorables que, con excesiva gala de suficiencia técnica, pero separados por completo de una tendencia utilitaria y práctica, han tenido a bien emitir, en relación con las demandas de concesiones hidráulicas para obras de centrales eléctricas, informes que dificultan la labor de electrificación de España y que convierten una carrera de obstáculos, lo que mejor debería ser una carrera de esfuerzos para la resolución de un gran problema que afecta a toda nuestra prosperidad económica.

Como comprobación de estas afirmaciones puede



presentarse el escaso rendimiento eléctrico de algunas cuencas hidrográficas, a pesar de la gran capacidad de embalse de los pantanos construidos o en proyecto. Véase el rendimiento eléctrico de la cuenca del Segura, en la que, con una capacidad de embalse, construido o en proyecto, de 894 millones de metros cúbicos, sólo tenía instalado un KVA. por cada 30.700 m<sup>3</sup> de agua embalsada, cuando el rendimiento eléctrico de las cuencas, no del todo bien aprovechadas, es de un KVA. instalado por cada 1.600 m<sup>3</sup> (véase río Segre).

Otro dato:

Mientras en el Ministerio de Industria y Comercio el Decreto de 5 de octubre de 1945 considera la construcción de las centrales eléctricas, bajo el aspecto de los suministros de cemento y de hierro, como obras de ABSOLUTA NECESIDAD NACIONAL, en otros departamentos el trámite para una concesión de aguas para una central eléctrica puede durar siete u ocho años y aún no ser resuelto o ser denegado, y esto en tramo de río sin aprovechamiento alguno. Pobre resultado de la aplicación poco afortunada de las normas del Reglamento de Concesiones Hidráulicas de 7 de enero de 1927.

Por otra parte, los ríos españoles están plagados de concesiones hidráulicas no realizadas y que ya no se realizarán, y de proyectos redactados con anterioridad al año 1936 sin estudio de su rendimiento eléctrico y, lo peor del caso, de pantanos realizados sin que el estudio eléctrico de los mismos haya sido una realidad.

De los 102 grandes pantanos españoles construidos y en proyecto, sólo 49 tenían central de pie de presa, o centrales influidas directamente por los mismos. Los otros 53 no creaban apenas energía eléctrica alguna (véase el mapa eléctrico publicado por la Dirección General de Industria en julio de 1946). Excepcionalmente algunas obras realizadas últimamente, en donde se observa magnífico espíritu de rectificación de pasados errores).

Es evidente, pues, la necesidad de modificar la actual legislación en el sentido de derogar la legislación anticuada y aprobar por la Presidencia del Gobierno otras leyes que den a la tramitación de los proyectos más rapidez y más eficacia.

Las leyes que debieran ser objeto de nuevo estudio son las siguientes:

1.º Ley de Aguas y sus modificaciones sucesivas.  
2.º Reglamento de Concesiones Hidráulicas de 7 de enero de 1927 y modificaciones sucesivas.

3.º Ley de expropiación forzosa y, en especial, la legislación referente a la creación de las actuales Confederaciones Hidrográficas en la forma como actualmente están organizadas.

Dicha legislación podría partir de los principios siguientes:

1.º Considerar como de interés nacional y, por lo tanto, como de ABSOLUTA NECESIDAD NACIONAL, la resolución del problema eléctrico español y propulsar la creación por el Estado y Corporaciones y por los particulares, de las centrales hidráulicas o térmicas necesarias, cualquiera que sea su importancia, decretando la Presidencia del Gobierno que las instalaciones para producción, transporte y distribución de energía eléctrica gocen del carácter de Industrias de Interés Nacional.

2.º Colaboración de todas las ramas de la Ingeniería española, Ingenieros Industriales, Agrónomos, de Caminos y de Minas, en la redacción de los proyectos que ha de efectuar el Estado, y libertad para todas las ramas de la Ingeniería española para presentar proyectos a la Administración.

3.º Colaboración del Estado, de las empresas de servicios públicos, de las Corporaciones públicas y de todos los abonados a la resolución del gran problema eléctrico.

4.º Coordinación de las actividades de los Ministerios de Industria y Comercio, de Agricultura y de Obras Públicas, en los proyectos del Estado, con la libertad, por parte de cada Ministerio y (con necesidad de informe de todos ellos), para ejecutar las obras que cada Ministerio crea necesarias al cumplimiento de sus fines específicos, con la facultad de obtener del Ministerio de Hacienda los medios económicos adecuados para ello, o de obtener por Decreto medios propios para la realización de sus fines específicos.

5.º Dar celeridad máxima a la tramitación de los expedientes, a la construcción de las obras, y limitar a la Administración la facultad de denegar un proyecto, siempre que no se demuestre la imposibilidad absoluta de su realización o que no existan en período de realización obras más importantes que la obra proyectada, en la zona objeto del proyecto.

6.º Anulación de las concesiones que no se hayan



realizado en su período normal y no estén en vías de realización inmediata y fijación de plazos máximos para la terminación de las obras que se encuentren en períodos de ejecución, tanto para las obras del Estado como obras particulares.

7.º Derogación de toda la legislación promulgada hasta la fecha sobre aguas, concesiones hidráulicas, leyes de expropiación forzosa y substitución de dicha legislación por otra más apropiada, creando nuevos organismos en donde intervengan ingenieros de las distintas especialidades y de los distintos Ministerios, coordinando los servicios y dando la facultad de expropiación forzosa y declaración de interés nacional o público a los organismos correspondientes de cada Ministerio afectado.

8.º Concesión de presupuestos adecuados a los Ministerios de Industria y Comercio, de Agricultura y de Obras Públicas, para la realización de aquellas obras que cada Ministerio crea necesarias al cumplimiento de sus propios fines.

9.º Protección económica y fiscal a las nuevas obras que realicen los particulares y Corporaciones sin fondos del Estado.

10. Eliminación de la competencia entre grandes y pequeñas empresas de servicios públicos mediante el establecimiento de tipos únicos de tarificación y precios únicos en cada tarifa, y establecimiento de impuesto regulador variable, según el mayor o menor coste del kw.-h. producido.

11. Construcción por el Estado de las obras consideradas necesarias y que, por su categoría o su coste, excedan de las posibilidades de las empresas de servicios públicos o que las empresas particulares consideren de escasa rentabilidad.

12. Substitución de la actual Dirección General de Obras Hidráulicas por un Comité Nacional Central de Electrificación, en donde entren representantes de la Presidencia del Gobierno, Ministerio de Industria y Comercio, Ministerio de Agricultura y Ministerio de Obras Públicas, representación de las empresas de servicios públicos y de los abonados y un número igual de ingenieros de las distintas ramas de la ingeniería española.

13. Substitución de las actuales Confederaciones Hidrográficas y Jefaturas de aguas por otros organismos que, con jurisdicción sobre una cuenca determinada, dependieran en cada provincia del Comité Na-

cional de Electrificación y tengan como dicho Comité un número igual de ingenieros en cada especialidad para el informe y redacción de proyectos.

14. Consideración de industrias de interés nacional a las industrias españolas de la electrificación y sus auxiliares.

15. Facultad del Estado, de las Diputaciones y Ayuntamientos para utilizar las líneas, redes e instalaciones de las empresas privadas, siempre que estas Corporaciones establezcan instalaciones eléctricas propias destinadas a eliminar restricciones eléctricas.

Hasta aquí lo más fundamental de la nueva legislación que precisa establecer.

Veamos ahora el aspecto económico de la cuestión.

#### ASPECTO ECONÓMICO DE LA CUESTIÓN ELÉCTRICA. — ¿QUIÉN DEBE ELECTRIFICAR? — MEDIOS ECONÓMICOS PARA REALIZAR LAS OBRAS

Uno de los aspectos más interesantes de la cuestión eléctrica es el aspecto económico.

Podríamos preguntar: ¿Cuáles son los perjuicios ocasionados por las restricciones eléctricas?

Esta pregunta nos sume en un mar de perplejidades. De un lado, debemos considerar las pérdidas reales ocasionadas por la falta de energía eléctrica y la suma de horas no trabajadas, y, de otro lado, la pérdida de potencial económico por las industrias que han dejado de establecerse o de ampliarse, por las hectáreas de terrenos que han dejado de convertirse en regables, las ocasiones de ventas al extranjero que han dejado de existir, etc., etc.

Dejaremos aparte estas consideraciones ya que se prestan, a falta de datos concretos, a muy discutibles maneras de ser apreciadas, y más que una discusión, nos interesa ir en busca de la solución adecuada.

La restricción se produce algunas veces por sequía, pero la mayor parte de las veces, por falta de las centrales hidráulicas que utilicen debidamente las precipitaciones acuosas o por la falta de centrales térmicas que compensen la escasez de energía hidráulica en algunas épocas del año, especialmente en épocas de verano.

El antiguo Ministerio de Fomento sólo consideró los grandes embalses como solución de un problema



único de riego. Dejó fuera de consideración, u orilló, el problema eléctrico.

De aquí el escaso rendimiento eléctrico de los pantanos españoles que ya hemos mencionado con anterioridad. Algunos, para justificar su error, han procurado excusarse en la afirmación de que dichas instalaciones eran económicamente poco rentables.

En la obra del Estado, la rentabilidad de la instalación no interesa. Lo que interesa es la satisfacción de una necesidad nacional sentida, con tal que esta satisfacción no suponga carga demasiado grave para la nación.

Más antieconómico ha sido para los españoles el no poseer energía eléctrica en la hora que más la necesitábamos.

Además, el Estado puede recurrir al impuesto público para compensar la falta de rentabilidad de una instalación. De no ser así, ¿cómo podríamos explicarnos las subvenciones del Estado a las empresas ferroviarias o navieras? ¿Es negocio la «Renfe» con su carácter de empresa nacionalizada? Creemos que no.

¿Por qué, pues, olvidar el factor eléctrico y no considerarlo de ahora en adelante la resolución de este problema, como una NECESIDAD PATRIA y decretar en consecuencia las instalaciones como de INTERÉS NACIONAL?

Consideramos que es preferentemente en verano cuando se suelta el agua en los grandes pantanos de riego, y consideremos cómo coinciden en esta época, la época de las grandes restricciones eléctricas. ¿Para qué no construir, pues, las centrales de pie de presa los pantanos que no la tienen?

Estas centrales, juntamente con la térmicas, adecuadas podrán compensar en gran parte la restricción de verano.

Es preciso pues, modificar en absoluto el criterio equivocado del antiguo Ministerio de Fomento.

Pero cabe hacerse una pregunta. ¿Quién DEBE ELECTRIFICAR? ¿El Estado, las Corporaciones o las empresas particulares?

Las instalaciones pueden considerarse en dos categorías. Unas son rentables, otras no. Esto, con las tarifas actuales. Si se modifican éstas, todas las instalaciones podrían convertirse en rentables.

Las empresas de servicio público, capitales reunidos para que produzcan determinado interés, no deben ser considerados como sociedades de socorros

mutuos. No puede obligárselos a la construcción de instalaciones que no reporten su beneficio. Mejor dicho, será necesario que la ley que se estudie garantizara, atendiendo al bien público, interés legal del 7 % como mínimo. De este modo, el capital particular afluiría en grandes cantidades para resolver el problema de la producción eléctrica en España.

Las instalaciones necesarias, pero menos rentables, y aquellas otras que, por la gran cuantía del capital que haya que aportar, no pueden ser emprendidas por las empresas particulares, pueden ser realizadas por el Estado o por las Corporaciones Públicas.

Dado su carácter de ABSOLUTA NECESIDAD NACIONAL, podrían ser construídas por el Estado las centrales a pie de presa en los pantanos de riego o las grandes centrales térmicas necesarias para compensar las restricciones eléctricas de verano. Bastante se ha hecho, pero es necesario hacer más.

Pero ¿con qué fondos deberá electrificar el Estado?

El Estado o las Corporaciones Públicas pueden disponer de varios tipos de ingresos para la electrificación:

1.º Destinando a la electrificación una parte de la recaudación general de Impuestos Generales del Estado, o de los ingresos ordinarios de las Corporaciones Públicas.

2.º Pueden concurrir al empréstito en el ámbito nacional, o en el extranjero (este último no aconsejable, excepto en el caso de poder ser compensado con los ingresos normales de la instalación realizada).

3.º Destinando a la electrificación los fondos inmovilizados de las cajas estatales independientes del Ministerio de Hacienda. Fondos tales como los del Instituto Nacional de Previsión, Cajas de Compensación del Paro por restricciones eléctricas, fondos inmovilizados en las Fiscalías de Tasas, Comisaría de Recursos, Instituto Nacional de la Vivienda, Comisaría de Abastecimientos y Transportes, Cajas del Montepío Laboral y C. N. S., Seguros de Enfermedad, etc., etc.

La previsión se extendería así al hecho de prevenir la falta de trabajo originado por la falta de energía eléctrica, y remediar la situación difícil de tantos españoles.

Esto no sería, pues, prevenir; sería, curar.

También podría el Estado legislar sobre la partici-



pación obligatoria de los abonados en la producción eléctrica. ¿Cómo? Creando una participación obligatoria para cada abonado de unos 0,20 ptas. por kilovatio-hora consumido en los abonos de alumbrado, y unos 0,10 ptas. por kw.-h. en los abonos de fuerza motriz. Participación que cobrarían las empresas a sus abonados en forma de sellos canjeables por obligaciones del Plan Nacional de Electrificación, obligaciones que vendrían garantizadas con interés del 6 % anual. No se trataría, pues, de un impuesto más, sino sólo de una participación obligatoria a una gran obra de ABSOLUTA NECESIDAD NACIONAL.

En este caso, podrían suprimirse los impuestos de derechos reales, de compensación de paro, recargos de energía térmica y otros que gravan en el momento actual el consumo de fluido eléctrico.

### FONDOS NECESARIOS PARA LA ELECTRIFICACIÓN

Se ha dicho anteriormente que el promedio en estos últimos años de las nuevas instalaciones que se ponen en servicio es del orden de los 120.000 KVA.

Se ha dicho también que el déficit anual, o sea lo que debiera instalarse, es del orden de 254.000 KVA.

El precio medio en el momento actual del KVA. instalado en las grandes instalaciones hidráulicas es del orden de los 4.500 ptas. por KVA. instalado. Resulta, pues, que entre las empresas y el Estado, se invierten anualmente unas 480.000.000 de pesetas anuales en la electrificación, y es necesario invertir en conjunto 1.486 millones de pesetas, cantidad que para más seguro acierto podemos estimarla definitivamente en 2.000 millones de pesetas anualmente.

Si bien esta cantidad parece importantísima, es sólo un 1/8 del presupuesto normal del Estado español, muy inferior o algo semejante al presupuesto de algunos ministerios. Además, se trata de una inversión rentable, en dos conceptos. Rentable bajo el punto de vista de aumento de la riqueza nacional, y rentable desde el punto de vista de que los kw.-h. producidos por estas instalaciones supondrían por el sólo impuesto de usos y consumos unos 23.600.000 de pesetas anuales contadas a base 0,16 pesetas de impuesto el kw.-h., en alumbrado, y 0,005 pesetas el kw.-h., en fuerza motriz. Además de la contribución de utilidades de las empresas explotadoras de estos servicios,

que serían alrededor de unos 49 millones de pesetas, o sea que un 3,6 % revierten anualmente al Estado.

Obsérvese que, al estudiar esta reversión al Estado, se ha prescindido del impuesto municipal, de los derechos reales que cargan sobre las facturaciones de alumbrado de viviendas, del impuesto de compensación de paro, del impuesto del timbre y de los impuestos que indirectamente recaen al Estado por aumento de la riqueza producida con el uso de esta energía.

El negocio es, pues, para el Estado, rentable. Además, de que estas cantidades ya hemos dicho pueden provenir no directamente del erario público, sino que también de los fondos inmovilizados de las cajas de organismos estatales con administración independiente y de la aportación forzosa de los abonados, tal como anteriormente se ha propuesto. Así, pues, el rendimiento para el Estado sería todavía más considerable.

### PROBLEMA TÉCNICO DE LA ELECTRIFICACIÓN

¿Dispone España de elementos técnicos y materias primas suficientes para afrontar el programa de electrificación nacional?

Afirmamos rotundamente que sí.

Los ingenieros de los organismos del Estado, Industriales, de Minas, Agrónomos y de Caminos, podrían estudiar las necesidades de las distintas zonas, el plan nacional de electrificación, los mapas estadísticos sobre los aprovechamientos existentes y posible establecimiento de nuevas centrales. Estudiar e informar las concesiones de industrias, riegos, de aguas. En fin, la electrificación es la gran obra a realizar con la colaboración de las grandes ramas de la ingeniería española. Hay faena para todos.

Cada rama de la ingeniería española en su especialidad y la armónica colaboración de todas ellas deberá intervenir para resolver el problema que en el momento actual es el más fundamental de la economía de la Patria.

Los países de técnica industrial adelantada son, en el momento actual, aquellos en que la colaboración técnica de las distintas especialidades es un hecho. Los conocimientos técnicos de una rama aislada cuentan ya bien poco en la industria moderna.

Por otra parte, debe considerarse el problema téc-



nico de la creación de grandes industrias auxiliares de la electrificación, como son la creación de grandes fábricas de turbinas hidráulicas y de turbinas de vapor, cuya necesidad queda justificada por el reemplazo del material propio de los 2.500.000 KVA. actualmente instalados en España y de la instalación anual de los 354.000 KVA. necesarios para compensar las restricciones eléctricas, y de los 6.500.000 de KVA. que aún pueden instalarse. Así como el problema de la fabricación de alternadores y generadores, transformadores, aparatos de medición y maniobra necesarios. Y también la creación de oficina técnica del Estado para los proyectos de la maquinaria eléctrica de más importancia.

Otro aspecto técnico es el de materias primas, aceites, cementos. En este aspecto la buena voluntad, el continuado esfuerzo y unos técnicos adecuados pueden hacer mucho.

La coordinación de las grandes empresas metalúrgicas y de construcción de máquinas con los talleres de inferior categoría, puede resolver muchos problemas que en la actualidad española están sin resolver.

Debemos pensar en el aprovechamiento íntegro de todas las posibilidades, o sea, crear en poco tiempo el gran mecanismo auxiliar de la electrificación, mecanismo de coordinación de los distintos talleres y de las distintas especialidades, que puedan resolver los problemas diversos que plantea la electrificación.

En fin, la electrificación es problema técnico que puede ser resuelto satisfactoriamente por la cooperación de las distintas ramas de la ingeniería española, y que técnicamente no tiene grandes secretos y sí, técnicamente, todas las posibilidades de ser resuelto.

#### ASPECTO PRÁCTICO Y CONSTRUCTIVO DE LA CUESTIÓN ELÉCTRICA.—CONCESIONES ÚTILES Y CONCESIONES QUE PRECISAN ABOLIRSE

El aspecto práctico de la cuestión eléctrica puede decirse que es sólo un problema de rapidez constructiva.

Las grandes empresas eléctricas han considerado el factor tiempo como factor esencial. El proverbio: «El tiempo es oro», no es sólo un proverbio, es una rea-

lidad económica. Puede afirmarse que todo proyecto de central eléctrica, cuyo período constructivo dure más de seis años, se convierte en antieconómico, sea cualquiera que sea, la importancia del aprovechamiento.

En este concepto, para las obras estables o de Corporaciones oficiales podría imponerse el criterio de aprobar el presupuesto total de la obra al aprobar el proyecto y seguir con depósito inmediato de la mitad del presupuesto aprobado a disposición del Ministerio afectado, a fin de que las obras a realizar no puedan interrumpirse en ningún momento en el período fijado para su ejecución.

Por otro lado, la fijación de unos plazos adecuados para la construcción, plazos inaplazables en algunos casos y con premios adecuados, ya de carácter fiscal, ya de subvenciones cuando la rapidez de la ejecución lo justificara, podría ayudar a resolución rápida del problema.

La anulación de las concesiones de obras hidráulicas cuyo período de ejecución esté terminado, y el proyecto no se haya realizado, es otro aspecto práctico de la cuestión. El registro inmediato de todas las concesiones de agua y aprovechamientos existentes, tanto de riego como de producción de energía, es otro aspecto a considerar.

En especial, el Estado debe considerarse propietario del agua de los ríos y como propietario de las reservas mineras españolas, pero no debe ser avaro, y sí muy pródigo en otorgar concesiones con garantía de inmediata explotación.

Ambas fuentes de riqueza no son útiles sino cuando son explotadas en toda su intensidad. La reserva a favor del Estado de dichas fuentes es perniciosa, si no va acompañada de proyecto de realización inmediata. La reserva para atender a proyectos que no tienen su presupuesto aprobado y a resultados sólo de lejanas realizaciones, entorpece la iniciativa privada.

El respeto de las realizaciones llevadas a cabo, la posibilidad de que toda iniciativa que disponga de capital llegue a ser una realidad, influirá tan favorablemente en el desarrollo de la economía de la Patria que la solución del problema eléctrico sería realidad tangible.



## POSIBILIDADES DE REALIZACIÓN DEL PROGRAMA ELÉCTRICO ESPAÑOL

La riqueza hidroeléctrica española que fué valorada hace muchos años en la posibilidad de instalar unos tres millones y medio de KVA., ha sido valorada modernamente con mejor información por ingeniero industrial español, en la posibilidad de establecer unos ocho millones y medio de KVA. hidráulicos en el momento actual.

La riqueza térmica eléctrica española ha sido valorada dentro de la posibilidad de instalar unos tres millones de KVA. de origen térmico.

Los aprovechamientos actualmente instalados (térmicos e hidráulicos) no rebasan los tres millones de KVA. instalados.

Queda, pues, un remanente de posibilidades de unos ocho y medio millones de KVA. que hay que instalar.

Esta posibilidad es lo suficiente grande para traer no solamente la atención de los financieros y técnicos, sino también la gran atención del Estado, de las Corporaciones y del público en general.

Manos, pues, a la obra, con la confianza puesta en Dios y con la inteligencia y las manos al servicio de España.

---

---

*Finalizada la labor de la Sección 2.ª, el Presidente hace sucinta exposición de aquélla, y tras de ello levanta la sesión a las catorce horas.*



## CONCLUSIONES DEL GRUPO SEGUNDO

### « ELECTRICIDAD »

*Las conclusiones deducidas de los trabajos que se publican en el presente tomo, estudiados en las respectivas Secciones del Grupo II-ELECTRICIDAD, fueron coordinadas y dispuestas para su presentación al Pleno del Congreso, en la reunión conjunta celebrada al efecto, por las Mesas de dichas Secciones con el Ponente General D. José María Oriol y Urquijo.*

*Estas conclusiones provisionales, impresas en las páginas 179 y 180 del Tomo I, se sometieron a examen y discusión en el Pleno y quedaron aprobadas en el celebrado el día 2 de junio de 1950, con la redacción que figura en las páginas 232 y 233 de dicho Tomo I.*

FIN DEL TOMO III







# ÍNDICE



INDICE



# ÍNDICE DEL TOMO TERCERO

## GRUPO II.—ELECTRICIDAD

	Páginas
SECCIÓN I.—Acta de las sesiones celebradas por la Sección I ... ..	9
N.º 174.— <i>Los reactores nucleares como fuente de energía</i> ... ..	9
N.º 272.— <i>La velocidad del viento en España y Marruecos</i> ... ..	27
N.º 137.— <i>Aprovechamiento de la energía eólica</i> ... ..	35
N.º 256.— <i>Potencia radiactiva natural</i> ... ..	57
N.º 60.— <i>Aprovechamiento de la energía de los ríos. Centrales situadas por debajo del nivel del río o saltos subterráneos</i> ... ..	61
N.º 195.— <i>Soluciones para el aprovechamiento industrial de la energía de las olas.</i>	65
PONENCIA.— <i>El problema eléctrico en España</i> ... ..	119
N.º 222.— <i>Sistematización de la cuenca del Ribagorzana</i> ... ..	175
SECCIÓN II.—Acta de las sesiones celebradas por la Sección II ... ..	219
N.º 21.— <i>España debe ampliar algunas de sus térmicas mediante el ciclo binario de mercurio</i> ... ..	219
N.º 200.— <i>Aumento del coeficiente de utilización de las centrales hidroeléctricas mediante el aprovechamiento de la energía en horas de madrugada...</i>	237
N.º 206.— <i>Mejoramiento de las curvas de carga por sistema de mando centralizado.</i>	249
N.º 118.— <i>El rayo y sus efectos en las líneas eléctricas</i> ... ..	263
N.º 119.— <i>Interconexión de varias centrales en una red de alimentación en bucle cerrado. Estudio y regularización de las cargas en la misma, así como de las potencias activa y reactiva de las centrales correspondientes. Apertura y cierre del bucle en servicio</i> ... ..	281
N.º 120.— <i>Estabilidad de la marcha en paralelo de las máquinas eléctricas sincrónicas</i> ... ..	345
N.º 236.— <i>Problemas que plantean en la producción y distribución de la energía eléctrica los embalses reguladores construídos, en construcción y en proyecto por el Estado español</i> ... ..	405
SECCIÓN III.—Acta de las sesiones celebradas por la Sección III ... ..	415
N.º 15.— <i>Potencial hidroeléctrico de España</i> ... ..	415
N.º 18.— <i>Avance de un inventario de las posibilidades termoeléctricas nacionales con combustibles sólidos</i> ... ..	437
N.º 19.— <i>Avance de un inventario de las posibilidades hidroeléctricas nacionales.</i>	445
N.º 106.— <i>Los supuestos económicos de una política eléctrica</i> ... ..	449
N.º 149.— <i>Necesidad de interpretar con ponderación los datos hidrológicos al justipreciar las posibilidades hidroeléctricas nacionales</i> ... ..	481
N.º 29.— <i>Las concesiones hidroeléctricas en la industrialización de España</i> ... ..	501
N.º 20.— <i>Apunte sobre el futuro eléctrico español</i> ... ..	509
N.º 148.— <i>Soluciones españolas al problema de la energía eléctrica</i> ... ..	513







## ERRATAS ADVERTIDAS

Dice:	Debe decir:	Página	Columna	Línea
encuentra el	encuentra explotada el	54	2. <sup>a</sup>	29
$b$	$b_0$	66	2. <sup>a</sup>	30
Examinada la misma figura 31 se observa que lo pro-	Si la curva de un compresor no toma el curso que	104	1. <sup>a</sup>	28
Areas de segundos	Areas por el número de segundos	191	1. <sup>a</sup>	7
$B$ ,	$B_2$	197	1. <sup>a</sup>	41
en	en $T$ ó $\pi$ ,	319	1. <sup>a</sup>	23
$Z_{11}$	$Z_{12}$	351	2. <sup>a</sup>	8
revela	releva.	405	2. <sup>a</sup>	4
155 kilovatios-hora	155 millones de kw.-h.	409	2. <sup>a</sup>	27



# ERRATAS-ADVERTIDAS

Libro	Capítulo	Folio	Errata	Advertida
1	1	1	1	1
2	2	2	2	2
3	3	3	3	3
4	4	4	4	4
5	5	5	5	5
6	6	6	6	6
7	7	7	7	7
8	8	8	8	8
9	9	9	9	9
10	10	10	10	10
11	11	11	11	11
12	12	12	12	12
13	13	13	13	13
14	14	14	14	14
15	15	15	15	15
16	16	16	16	16
17	17	17	17	17
18	18	18	18	18
19	19	19	19	19
20	20	20	20	20
21	21	21	21	21
22	22	22	22	22
23	23	23	23	23
24	24	24	24	24
25	25	25	25	25
26	26	26	26	26
27	27	27	27	27
28	28	28	28	28
29	29	29	29	29
30	30	30	30	30
31	31	31	31	31
32	32	32	32	32
33	33	33	33	33
34	34	34	34	34
35	35	35	35	35
36	36	36	36	36
37	37	37	37	37
38	38	38	38	38
39	39	39	39	39
40	40	40	40	40
41	41	41	41	41
42	42	42	42	42
43	43	43	43	43
44	44	44	44	44
45	45	45	45	45
46	46	46	46	46
47	47	47	47	47
48	48	48	48	48
49	49	49	49	49
50	50	50	50	50
51	51	51	51	51
52	52	52	52	52
53	53	53	53	53
54	54	54	54	54
55	55	55	55	55
56	56	56	56	56
57	57	57	57	57
58	58	58	58	58
59	59	59	59	59
60	60	60	60	60
61	61	61	61	61
62	62	62	62	62
63	63	63	63	63
64	64	64	64	64
65	65	65	65	65
66	66	66	66	66
67	67	67	67	67
68	68	68	68	68
69	69	69	69	69
70	70	70	70	70
71	71	71	71	71
72	72	72	72	72
73	73	73	73	73
74	74	74	74	74
75	75	75	75	75
76	76	76	76	76
77	77	77	77	77
78	78	78	78	78
79	79	79	79	79
80	80	80	80	80
81	81	81	81	81
82	82	82	82	82
83	83	83	83	83
84	84	84	84	84
85	85	85	85	85
86	86	86	86	86
87	87	87	87	87
88	88	88	88	88
89	89	89	89	89
90	90	90	90	90
91	91	91	91	91
92	92	92	92	92
93	93	93	93	93
94	94	94	94	94
95	95	95	95	95
96	96	96	96	96
97	97	97	97	97
98	98	98	98	98
99	99	99	99	99
100	100	100	100	100







